

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mateja Radić

Zagreb, 2015. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc.dr.sc. Mislav Čehil, dipl. ing.

Student:

Mateja Radić

Zagreb, 2015. godina

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Mislavu Čehilu na pruženom znanju i pomoći tijekom izrade ovog diplomskog rada, te na strpljenju i vremenu za sve moje upite.

Zahvaljujem cijeloj svojoj obitelji i svim prijateljima koji su uvijek bili uz mene i bez kojih bi sve bilo znatno teže. Također zahvaljujem svom dečku koji je bio uz mene sve godine i pomogao mi kad god je trebalo.

I na kraju, najveću zaslugu za ono što sam postigla pripisujem svojim roditeljima i sestrama koji su uvijek bili uz mene, u teškim i u sretnim trenucima i bez kojih sve ovo ne bi bilo moguće.

Mateja Radić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: Mateja Radić

Mat. br.: 0035177964

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Matematički model Medupi elektrane, Južnoafrička Republika

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Mathematical model of Medupi power plant, South Africa

Opis zadatka:

U Južnoafričkoj Republici trenutno se gradi elektrana na ugljen sa 6 blokova po 764 MW električne snage. Generatori pare su natkritični sa svježom parom temperature 560°C i tlakom od 241 bar. U radu je potrebno napraviti matematički model generatora pare, parne turbine, kondenzatora, napojne pumpe kao i svih zagrijača napojne vode. Budući da je kondenzator hlađen zrakom, potrebno je prikazati ovisnost stupnja iskoristivosti elektrane o vanjskoj temperaturi i površini kondenzatora. Potrebno je također prikazati sve bitne rezultate i pri nižim opterećenjima rada postrojenja.

Sva literatura nalazi se kod mentora.

U radu treba navesti korištenu literaturu i eventualnu dobivenu pomoć prilikom izrade rada.

Zadatak zadan:

24. rujna 2015.

Rok predaje rada:

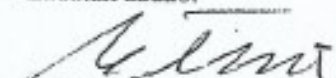
26. studenog 2015.

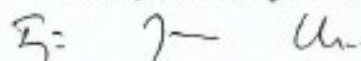
Predviđeni datumi obrane:

2., 3. i 4. prosinca 2015.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:


Doc. dr. sc. Mislav Čehić



SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
1. TERMOELEKTRANE	4
2.1. Vrste termoelektrana.....	4
2.2. Termoelektrane na ugljen	10
2.2.1. Ugljen i tehnologije čistog ugljena.....	12
2.3. Glavni dijelovi termoelektrane na ugljen	15
2.3.1. Parna turbina	15
2.3.1.1. Toplinski proces u turbinskom stupnju.....	16
2.3.2. Kondenzator	24
2.3.2.1. Toplinski procesi u kondenzatoru	25
2.3.2.2. Konstrukcija kondenzatora	26
2.3.2.3. Ejektori.....	28
2.3.3. Rashladni tornjevi	29
2.3.3.1. Podjela rashladnih tornjeva.....	30
2.3.3.2. Vodeni rashladni toranj.....	32
2.3.3.3. Zračni rashladni toranj	33
2.3.4. Generator pare	35
2.3.4.1. Podjela generatora pare.....	36
2.3.4.2. Dijelovi generatora pare.....	37
3. TERMOELEKTRANA MEDUPI	41
3.1. Tehnički podaci	43
3.1.1. Generator pare u Medupi elektrani.....	43
3.1.1.1. Nadkritični generatori pare	47
3.1.2. Parna turbina u Medupi elektrani	48
3.1.3. Električni generator	50

3.1.4. Kondenzator	51
3.2. Utjecaj na okoliš i društvo	54
4. ZRAKOM HLAĐENI KONDENZATORI	56
4.1. Prednosti zrakom hlađenih kondenzatora	58
4.2. Nedostaci zrakom hlađenih kondenzatora	59
5. MATEMATIČKI MODEL	60
6. ZAKLJUČAK	70
7. LITERATURA	71
PRILOZI.....	72

POPIS SLIKA

Slika 1.	Manjak kapaciteta energije u Južnoafričkoj republici [1].....	1
Slika 2.	Elektrane u Južnoafričkoj Republici [2]	2
Slika 3.	Shema plinsko – turbinskog postrojenja [10]	5
Slika 4.	Kružni proces plinsko - turbinskog postrojenja u T-s dijagramu [11].....	5
Slika 5.	Shema parno – turbinskog postrojenja [11]	6
Slika 6.	Kružni proces parno - turbinskog postrojenja u T-s dijagramu [11].....	7
Slika 7.	Shema kombiniranog postrojenja [11].....	8
Slika 8.	Kružni proces kombiniranog postrojenja u T-s dijagramu [11].....	9
Slika 9.	Usporedba stupnja korisnosti različitih termoenergetskih postrojenja	9
Slika 10.	Jednostavni prikaz termoelektrane na ugljen [13]	11
Slika 11.	T-s dijagram Rankineovog procesa koji se odvija u termoelektrani.....	11
Slika 12.	Globalne zalihe ugljena [20].....	12
Slika 13.	Ispiranje ugljena [20]	13
Slika 14.	Odvajanje krutih čestica [20]	13
Slika 15.	Mokro odsumporavanje [20].....	14
Slika 16.	Promjena entalpije u h,s – dijagramu [10]	18
Slika 17.	Sužavajuća sapnica [10].....	18
Slika 18.	Sužavajuća – proširujuća mlaznica [10]	19
Slika 19.	Presjek statorskih i rotorskih lopatica akcijskog stupnja [10].....	20
Slika 20.	Pretvorba energije u akcijskom stupnju [10]	20
Slika 21.	Presjek statorskih i rotorskih lopatica reakcijskog stupnja [10]	21
Slika 22.	Pretvorba energije u reakcijskom stupnju.....	22
Slika 23.	Presjek kroz parni kondenzator hlađen rashladnom vodom [13].....	24
Slika 24.	Prikaz tipičnog kondenzatora u termoelektrani [14].....	27
Slika 25.	Shema ejektora.....	28
Slika 26.	Shema otvorenog rashladnog sustava	29
Slika 27.	Strujanje zraka prirodnom ventilacijom.....	30
Slika 28.	Strujanje zraka prisilnom ventilacijom	31
Slika 29.	Shema sustava s rashladnim tornjem s direktnim sustavom	33
Slika 30.	Shema sustava s rashladnim tornjem s indirektnim sustavom.....	33
Slika 31.	Vodeno – zračni rashladni toranj [12]	34

Slika 32.	Shema generatora pare [13]	35
Slika 33.	Prikaz nadkritičnog postorjenja sa svim dijelovima	40
Slika 34.	Lokacija termoelektrana Medupi i Kusile [6]	41
Slika 35.	Stroj za iskapanje ugljena u rudniku Grootegeluk [21]	42
Slika 36.	Gradilište elektrane Medupi [7]	43
Slika 37.	Generatori pare elektrane Medupi u izgradnji [7].....	44
Slika 38.	Izmjenjivačke površine i cijevi generatora pare	45
Slika 39.	Konstrukcija za dovoz ugljena do kotla [21]	46
Slika 40.	Sakupljači pepela	46
Slika 41.	Stupanj iskoristivosti različitih generatora pare [8]	47
Slika 42.	Dijelovi parne turbine Alstom STF100 [6]	48
Slika 43.	Parna turbina Alstom STF100, 800 MW [6]	49
Slika 44.	Električni generator u Medupiju	50
Slika 45.	Dalekovod u izgradnji [6]	50
Slika 46.	Nosiva konstrukcija kondenzatora	51
Slika 47.	Ventilatori kondenzatora [7]	52
Slika 48.	Pogled na kondenzator u izgradnji [7]	52
Slika 49.	Prikaz izmjenjivačkih površina kondenzatora	52
Slika 50.	Spoj niskotlačnog dijela turbine i kondenzatora [6]	53
Slika 51.	Dizalica za izgradnju generatora pare visine 140 m	55
Slika 52.	Prikaz zrakom hlađenog kondenzatora [18].....	56
Slika 53.	Dijelovi zrakom hlađenog kondenzatora oblika A – okvira [19].....	57
Slika 54.	Procesni dijagram kružnog ciklusa	60
Slika 55.	T,s - dijagram idealnog procesa u Medupi elektrani.....	61
Slika 56.	Ovisnost stupnja iskoristivosti o vanjskoj temperaturi zraka	63
Slika 57.	Ovisnost temperature kondenzacije o vanjskoj temperaturi zraka.....	64
Slika 58.	Ovisnost tlaka kondenzacije o temperaturi vanjskog zraka	65
Slika 59.	Ovisnost stupnja iskoristivosti elektrane o površini kondenzatora.....	66
Slika 60.	Ovisnost temperature kondenzacije o površini kondenzatora.....	67
Slika 61.	Ovisnost tlaka kondenzacije o površini kondenzatora	67
Slika 62.	Ovisnost stupnja iskoristivosti elektrane o stupnju opterećenja	68
Slika 63.	Ovisnost temperature kondenzacije o stupnju opterećenja	69
Slika 64.	Ovisnost tlaka kondenzacije o stupnju opterećenja	69

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vremenski redoslijed planiranih kapaciteta u MW [9]	3
Tablica 2. Ulazni podaci za matematički model	62
Tablica 3. Vrijednosti stupnja iskoristivosti, temperature i tlaka kondenzacije i izlazne snage s obzirom na vanjsku temperaturu zraka	63
Tablica 4. Vrijednosti stupnja iskoristivosti, temperature i tlaka kondenzacije i izlazne snage s obzirom na površinu kondenzatora (promjer ventilatora)	65
Tablica 5. Vrijednosti stupnja iskoristivosti, temperature i tlaka kondenzacije i izlazne snage s obzirom na stupanj opterećenja	68

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
D	m	Promjer ventilatora
h	kJ/kg	Entalpija
p	Pa	Tlak
v	m ³ /kg	Specifični volumen
T	°C	Temperatura
R	J/kgK	Plinska konstanta
q	kJ/kg	Specifična toplina
ρ	kg/m ³	Gustoća
η	%	Stupanj iskoristivosti
pp	Pa	Parcijalni tlak pare u smjesi
p _{kond}	Pa	Tlak kondenzacije
T _{kond}	°C	Temperatura kondenzacije
P _{netto}	MW	Izlazna snaga

SAŽETAK

Ekonomski razvoj Južnoafričke Republike uvjetovan je sigurnom opskrbom električne energije. U svrhu pokrivanja potrebnog baznog opterećenja, grade se dvije moderne termoelektrane na ugljen, Medupi i Kusile, svaka kapaciteta 4800 MW što čini 25 % trenutno raspoložive električne energije u Južnoj Africi. Radi nedostatka vode, kako pitke tako i rashladne, termoelektrane će imati zrakom hlađene kondenzatore koji će biti najveće postrojenje takvog tipa u Svijetu. Iskoristivost takvih kondenzatora ovisi ponajviše o vanjskim uvjetima zraka, prvenstveno o temperaturi koja je za to područje doseže preko 40 °C. U ovom diplomskom radu bit će napravljen proračun termoelektrane Medupi odnosno jedne njene jedinice od 800 MW. Proračunat će se i dati ovisnost iskoristivosti elektrane o promjeni vanjske temperature zraka i o površini kondenzatora.

U prvom dijelu rada detaljno je opisan rad moderne termoelektrane i svih njenih dijelova koje je potrebno poznavati kako bi se odredio njihov utjecaj na iskoristivost postrojenja. Dan je opis generatora pare, parne turbine, kondenzatora i električnog generatora.

U drugom dijelu opisana je termoelektrana Medupi te su dani svi tehnički podaci potrebni za proračun i matematički model same elektrane. Također je detaljno opisan rad zrakom hlađenih kondenzatora.

Na kraju je predstavljen matematički model rada elektrane te su prikazani rezultati u obliku dijagrama ovisnosti iskoristivosti postrojenja o vanjskim uvjetima i samoj izvedbi kondenzatora.

Ključne riječi: termoelektrana, zrakom hlađeni kondenzator, stupanj iskoristivosti, matematički model

SUMMARY

Economic development of South Africa depends of secure electric power supply. In order to cover the required base load, two modern coal power plants, Medupi and Kusile, are being built. The capacity of both plants is 4800 MW, which means total of 9600 MW, which is 25 % of currently available electric power in South Africa. Due to the lack of water, Medupi and Kusile will have an air – cooled condensers, which will be the largest condensers of this type in the World. Efficiency of these condensers depends largely on external air conditions, particularly air temperature, which for South African area reaches over 40 °C. This thesis consists of thermodynamic calculation of thermal power plant Medupi, i.e one of Medupi's 800 MW unit. Energy efficiency will be calculated depending on increase of external air temperature and on the surface of the condenser,.

First part of this thesis brings detailed description of energy production in modern coal power plant. All main parts of power plant are also described as they affect the most efficiency of cycle. Main components of coal power plant are steam generator, steam turbine, condenser, pump and electric generator.

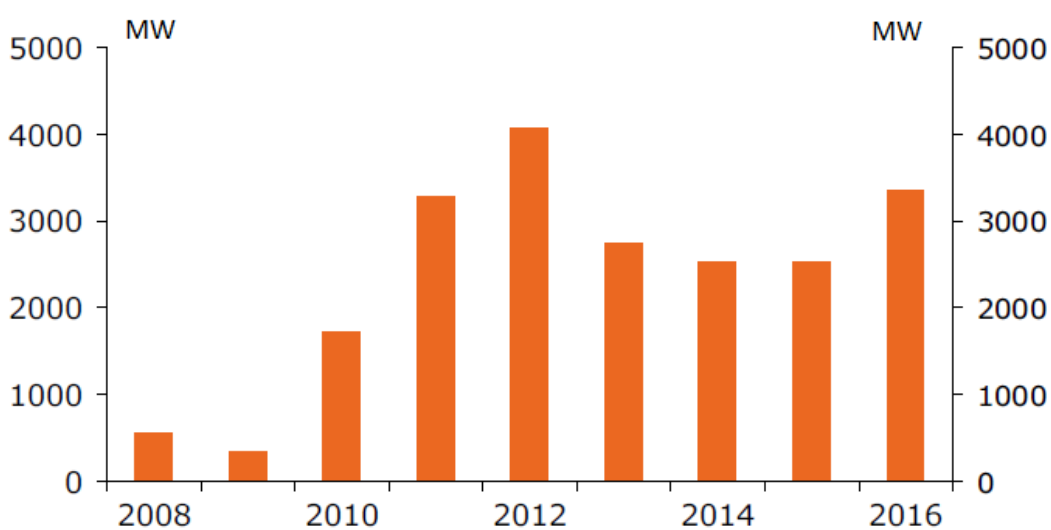
Second part of thesis gives detailed description of Medupi coal power plant and also technical data required for calculation of mathematical model. Design of air – cooled condensers and also thermodynamic properties have been given in this part of thesis.

Last part of thesis presents a mathematical model of one of the Medupi's 800 MW power unit with diagram results of energy efficiency dependance on external conditions and geometry of condenser.

Keywords: thermal power plant, air – cooled condenser, energy efficiency, mathematical model

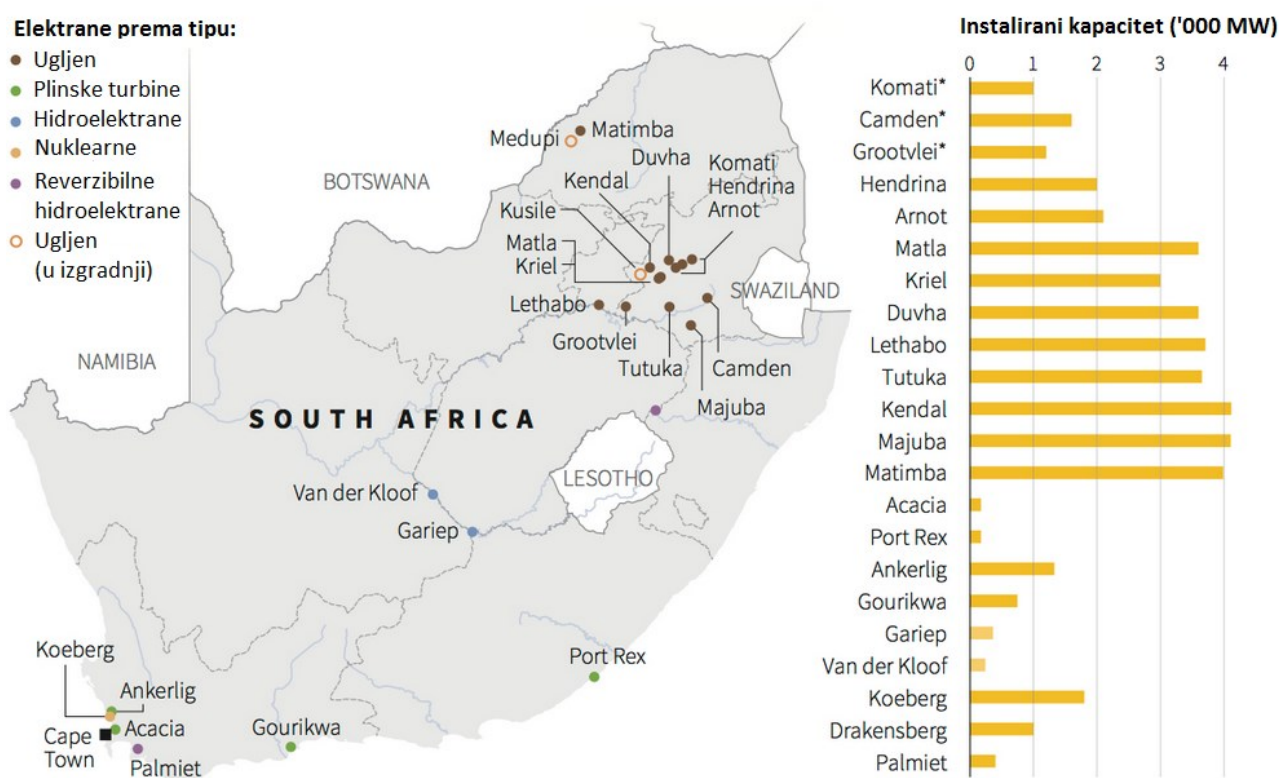
1. UVOD

Nedostatak pouzdane opskrbe električnom energijom u velikoj mjeri utječe na gospodarstvo Južne Afrike. Do naglog povećanja potrebe za električnom energijom došlo je 2007. godine u studenom, a vrhunac potražnje zbio se u siječnju 2008. godine kada je tvrtka Eskom, koja je glavna elektroenergetska kompanija u južnoafričkoj republici s ukupnim udjelom u opskrbi električnom energijom od 95 %, objavila takozvani „force majeure“ tj. neizbježnu nesreću koja se ne može spriječiti ni predvidjeti. Eskom nije imao dovoljno rezervnog kapaciteta energije koji je bio potreban da se zadovolje tadašnje potrebe i hitno je tražio od korisnika da smanje potrošnju kako bi se spriječio totalni kolaps energetskog sustava. Eskom je također zatvorio dotok energije određenim područjima, kapacitet termoelektrana bio je smanjen jer je ugljen zbog jakih kiša bio moker, a prekidi rada zbog kvara opreme bili su neočekivano veliki. Zbog svih ovih problema, Eskom se u suradnji s Odjelom za energetiku Južnoafričke Republike odlučio za gradnju dvije nove moderne termoelektrane na ugljen, Kusile i Medupi, svaka kapaciteta 4800 MW. Južnoafričko gospodarstvo prolazi kroz energetska krizu, potrebe za električnom energijom povećavaju se svakim danom i u tom smislu Kusile i Medupi će pružiti sigurnost opskrbe električnom energijom koja je u ovom trenutku prijeko potrebna. Na slici 1 prikazan je manjak kapaciteta energije do kojega bi došlo kada ne bi postajalo ograničenje na potrošnju energije koje je trenutno na snazi.



Slika 1. Manjak kapaciteta energije u Južnoafričkoj republici [1]

Termoelektrane na ugljen čine najveći dio južnoafričkih baznih elektrana odnosno elektrana koje rade 24 sata dnevno kako bi zadovoljile potražnju za električnom energijom. Eskom je u vlasništvu 13 termoelektrana s ukupnim kapacitetom od 37 745 MW. Njihova ukupna neto izlazna snaga, ne računajući snagu koja se koristi za pokretanje pomoćnih uređaja i generatora u elektrani, iznosi 34 952 MW. Nuklearna elektrana Koeberg sa kapacitetom 1910 MW je također bazna elektrana. Za pokrivanje vršne energije odnosno kada dođe do naglog porasta potražnje za električnom energijom kojeg ne mogu pokriti bazne elektrane, koriste se dvije hidroelektrane ukupnog kapaciteta 2000 MW i četiri plinska postrojenja kapaciteta 2426 MW. Na slici 2 prikazane su sve elektrane u vlasništvu Eskoma kao i njihov ukupni instalirani kapacitet. Termoelektrane Medupi i Kusile će dodati ukupno 9564 MW za potrebe bazne energije. [2]



Slika 2. Elektrane u Južnoafričkoj Republici [2]

Južna Afrika je doživjela iznadprosječan rast BDP-a u zadnjih nekoliko godina (5,4 % u 2006. godini i 5,1 % u 2007. godini) što je u potrebama električne energije rezultiralo povećanjem potražnje za 4 %. Međutim, država nije mogla ispuniti tako nagli porast za energijom pa je gospodarski rast usporen na oko 0,2 % 2008. godine te 1,9 % 2009. godine. Usporavanje rasta BDP-a u kombinaciji sa suzbijanjem zahtjeva za povećanjem potrošnje energije dovelo je do odluke o izgradnji novih termoelektrana koje će omogućiti nastavak gospodarskog razvoja zemlje. Eskom je razvio program za iduće desetljeće koji uključuje izgradnju novih plinskih postrojenja za vršna opterećenja, povećanje proizvodnje energije poboljšanjem učinkovitosti starih postrojenja te izgradnju novih baznih postrojenja. Ukupan planirani dodatni kapacitet do 2025. godine je oko 40 GW što bi bilo dovoljno za zadovoljavanje potreba za energijom i za porast BDP-a za 6 %. [2]

Kao što je već rečeno, Eskom proizvodi 95 % električne energije potrošene u Južnoj Africi i otprilike 45 % električne energije potrošene u cijeloj Africi. Eskom je 2010. godine prodao 218,591 GWh energije, od čega je 205,364 GWh (94 %) prodano u Južnoj Africi. Ukupni kapacitet novih termoelektrana iznosi 25 % trenutne proizvodnje energije Eskoma. Vremenski redoslijed planiranog puštanja u pogon pojedinih jedinica prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Vremenski redoslijed planiranih kapaciteta u MW [9]

	2012. god	2013. god	2014. god	2015. god	2016. god	Ukupno
Medupi	1588	794	1588	794	/	4764
Kusile	/	1,600	800	1600	800	4800

Nažalost, predviđeno vrijeme izgradnje elektrana je produženo do 2021. godine zbog raznih financijskih problema, štrajka i zastoja u izgradnji. Trenutno je samo jedna jedinica od 800 MW u termoelektrani Kusile puštena u pogon.

Ukupni inicijalno predviđeni trošak za Medupi elektranu iznosio je 17 milijardi američkih dolara i za Kusile 19 milijardi američkih dolara. Eskom će financijski sudjelovati s ukupno 53 % od ukupnog iznosa, multilateralne kompanije poput Afričke banke za razvoj (African Development Bank) i Svjetske banke (World Bank) s 36 % i ostale financijske institucije s 11 % .[9] Iz istih razloga zbog kojih je vrijeme izgradnje znatno produženo, i financijski troškovi su se znatno povećali.

1. TERMoeLEKTRANE

Termoelektre su termoenergetska postrojenja koja energiju dobivaju sagorijevanjem goriva, a glavna primjena i svrha im je proizvodnja pare koja će pokretati turbinu, a potom i generator električne energije. Osnovna namjena termoenergetskih postrojenja je proizvodnja i transformacija primarnih oblika energije u koristan rad, koji se kasnije u obliku mehaničke energije dalje iskorištava za proizvodnju električne energije. Mehanička energija je proizvedena uz pomoć toplinskog stroja koji transformira toplinsku energiju. Kemijska energija pretvara se u toplinsku koja se pak različitim procesima predaje nekom radnom mediju. Radni medij služi kao prijenosnik te energije, često izgaranjem goriva, u energiju vrtnje.

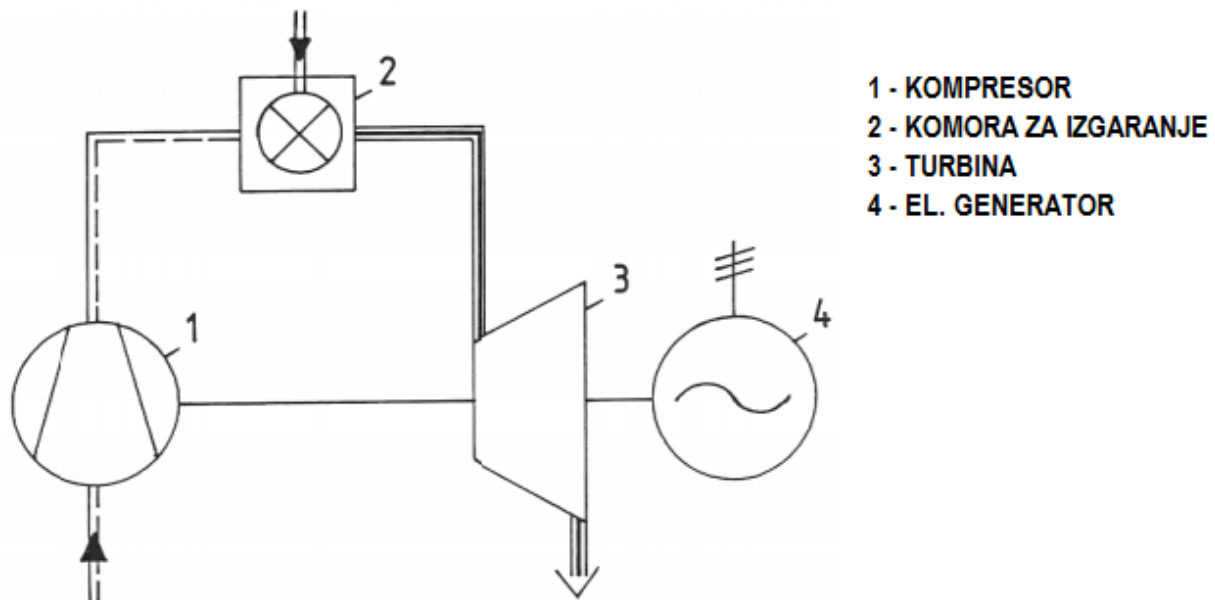
2.1. Vrste termoelektrana

Prema vrsti pokretača (stroj koji u slijedu energetske transformacije prvi pretvara bilo koji oblik energije u mehaničku energiju) dijelimo ih na : plinsko-turbinsko postrojenje, parno turbinsko postrojenje i kombinirano postrojenje.

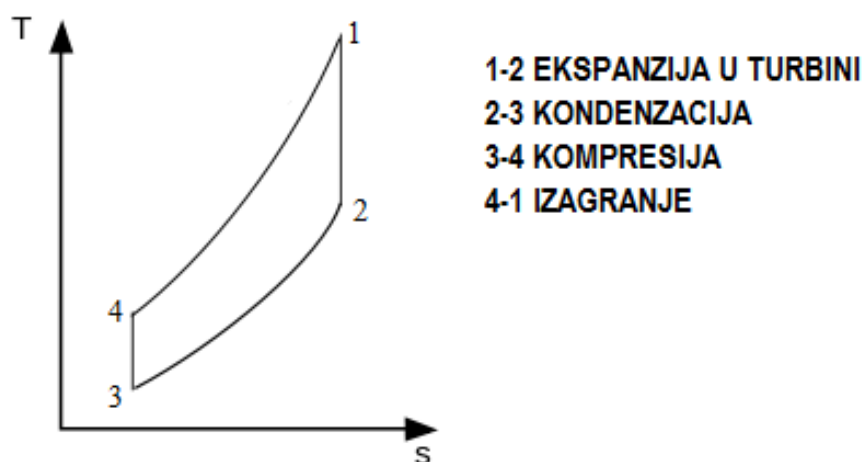
- Plinsko – turbinsko postrojenje

Plinsko-turbinsko postrojenje iskorištava dinamički tlak stvoren protokom plinova za direktno pokretanje turbine. Proces koji se odvija u plinskoj turbini nije toliko različit od procesa u parnoj turbini. Različiti su medij koji ekspandira i postupak dobivanja radnog medija. Glavna razlika je što je pad entalpije u plinskoj turbini puno manji, a porast volumena veći. Ako želimo povećati stupanj iskorištenja moramo povećati temperaturu medija koji ulazi u turbinu. Tu se javlja problem hlađenja, pogotovo samih lopatica. Kako bismo ohladili lopatice koristimo komprimirani zrak iz kondenzatora. Naravno dovođenje zraka za hlađenje će smanjiti i snagu postrojenja. Današnji razvoj materijala nam je omogućio da i izborom materijala povećamo otpornost na temperaturu. Za izradu lopatica se danas koriste visoko legirani materijali na bazi nikla koji uspješno podnose više temperature. Naravno bez obzira na ova dostignuća na području materijala moramo osigurati hlađenje lopatica. U plinskim elektranama se mehanička energija pretvara u električnu pomoću plinskih motora ili plinskih turbina, koji se najčešće grade kao četverotaktni motori. Ove elektrane su obično u sustavu metalurgijskih postrojenja radi iskorištenja plinova iz visokih peći ili u sustavu koksara i postrojenja za dobivanje plinova radi iskorištenja plinova koji nastaju pri dobivanju koksa, zatim za iskorištavanje zemnog plina itd. Ako želimo povećati stupanj iskorištenja moramo povećati temperaturu medija koji ulazi u turbinu. Svako plinsko-turbinsko postrojenje sastoji

se od kompresora, komore za izgaranje i plinske turbine. Princip rada : kompresor služi za stlačivanje zraka kojeg usisava iz okoliša te ga komprimira do nekog zadanog tlaka, komprimirani zrak dovodi se do komore izgaranja gdje se grije uslijed izgaranja goriva. Smjesa koja nastaje (zagrijani zrak i plinovi izgaranja) ekspandiraju u plinskoj turbini gdje stvaraju moment koji se iskorištava u proizvodnji električne energije i pri radu kompresora.



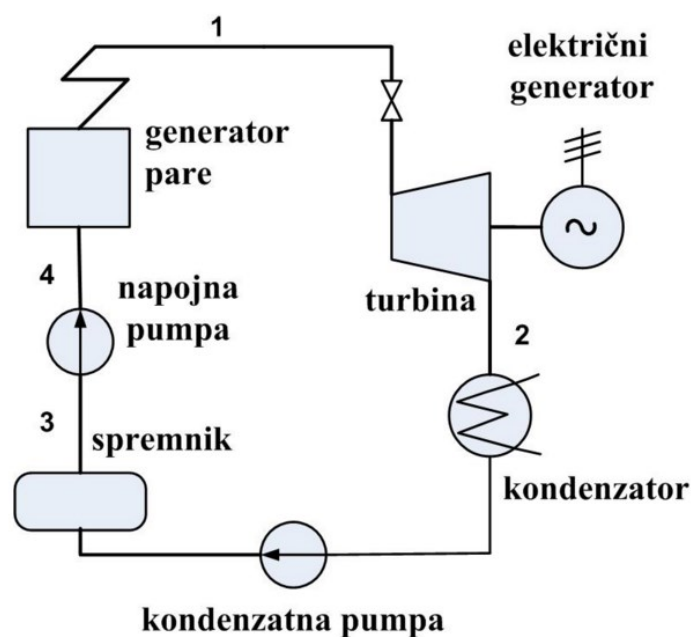
Slika 3. Shema plinsko – turbinskog postrojenja [10]



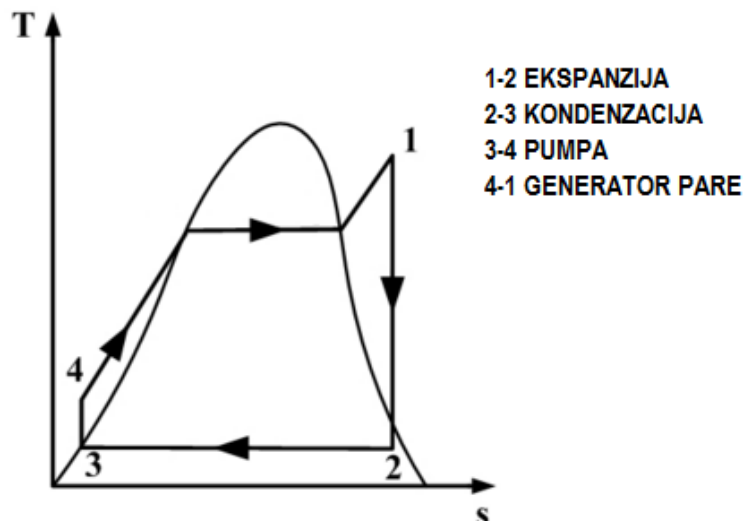
Slika 4. Kružni proces plinsko - turbinskog postrojenja u T-s dijagramu [11]

- Parno – turbinsko postrojenje

Princip rada parnog - turbinskog postrojenja: para se proizvodi pomoću topline dobivene izgaranjem goriva te se odvodi u turbinu gdje ekspandira stvarajući moment koji služi za proizvodnju električne energije u generatoru.. Najveći broj velikih termoelektrana su upravo parno – turbinska postrojenja, kod kojih se uglavnom koriste parne turbine (oko 80 % električne energije je proizvedeno korištenjem parnih turbina) spojene s generatorom odnosno turbo-generatorom. Prema drugom zakonu termodinamike sva toplinska energija ne može biti pretvorena u mehaničku energiju, zato se dio topline uvijek izgubi u okolini. Ako se taj gubitak iskoristi u obliku korisne topline, za industrijske procese ili grijanje prostora, parno postrojenje se naziva kogeneracija. Klasično parno-turbinsko postrojenje zasniva se na Rankineovom ciklusu poznatom iz termodinamike.



Slika 5. Shema parno – turbinskog postrojenja [11]

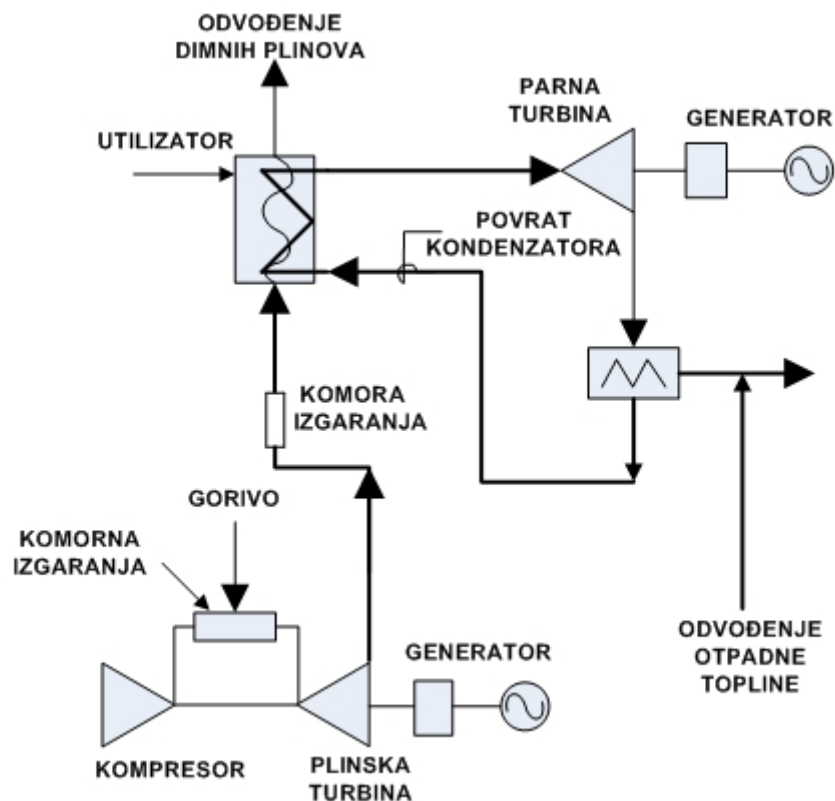


Slika 6. Kružni proces parno - turbinskog postrojenja u T-s dijagramu [11]

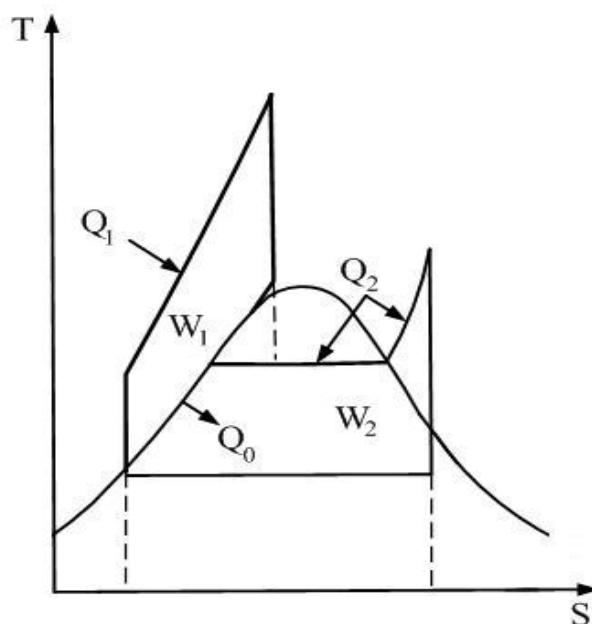
- Kombinirano postrojenje

Kombinirano postrojenje ima i plinske turbine ložene prirodnim plinom, parni kotao te parnu turbinu koja koristi iscrpljeni plin iz plinske turbine kako bi se proizvela električna energija, tj. to je ciklus koji se sastoji od plinsko - turbinskog i parno - turbinskog dijela. Glavne sastavnice su naravno plinska i parna turbina. Osnovna namjena ovakvih postrojenja je da se iskoristi toplina nastala na izlazu iz plinske turbine. Budući da ispušni plinovi koji izlaze iz plinske turbine imaju izuzetno visoke temperature, oko 600 °C mogu se iskoristiti kao sredstvo koje će grijati vodu i proizvoditi vodenu paru za parnu turbinu. Time povećavamo iskoristivost samog procesa, jer je toplina koju bi inače izgubili iskorištena za daljnju proizvodnju pare. Iskoristivost takvog postrojenja doseže i do 60%. U kombiniranom postrojenju kompresor komprimira zrak i šalje ga u komoru izgaranja gdje se istovremeno dovodi gorivo za izgaranje. Plinovi izgaranja vrlo visoke temperature vode se iz komore izgaranja u plinsku turbinu, gdje ekspandiraju dajući koristan rad na vratilu spojenom na rotor plinske turbine. Vratilo pokreće generator električne struje i proizvodi električnu energiju koja se šalje u mrežu. Nakon ekspanzije, ispušni se plinovi iz plinske turbine vode u utilizator (generator pare na otpadnu toplinu). Jedna od vrlo dobrih karakteristika plinske turbine je ta što je kod nje prisutan vrlo visok omjer zrak/gorivo budući se dodaje nekoliko puta više zraka zbog hlađenja lopatica plinske turbine. Zbog toga na izlazu iz plinske turbine ostaje još dosta neiskorištenog zraka te se taj višak zraka koristi za izgaranje dodatnog goriva u utilizatoru. U utilizatoru se napojna voda zagrijava do isparavanja i pregrijava na zadane parametre. Pregrijava para odlazi iz generatora pare u parnu turbinu gdje

ekspandira i predaje mehanički rad generatoru električne struje. Nakon toga para, sada već niskih parametara, odlazi u kondenzator gdje kondenzira. Nakon kondenzacije, voda se napojnom pumpom vraća u utilizator na ponovno zagrijavanje. Već je napomenuto da ovim principom povećavamo iskoristivost čitavog procesa. Razlog pronalazimo u osnovama termodinamike. Temelje možemo vidjeti u temeljnom Carnotovom procesu (izentropsko-izotermnom). Princip je sljedeći: ako su temperaturne razlike manje, manji je i prijenos topline. Dakle nama je od izuzetne važnosti da je ta razlika temperatura „spremnika“ što veća. Naravno idealni slučaj bi bio ako bi temperatura radne tvari kod dovođenja topline bila jednaka temperaturi ogrjevnog spremnika, a temperatura radne tvari kod odvođenja postane jednaka temperaturi rashladnog spremnika. Tada govorimo o idealnom Carnotovom procesu. Znamo da kod Carnotovog procesa iskoristivost ovisi samo o temperaturi, odnosno temperaturi toplinskih spremnika te se nikakvim drugim varijablama ta iskoristivost ne može promijeniti.

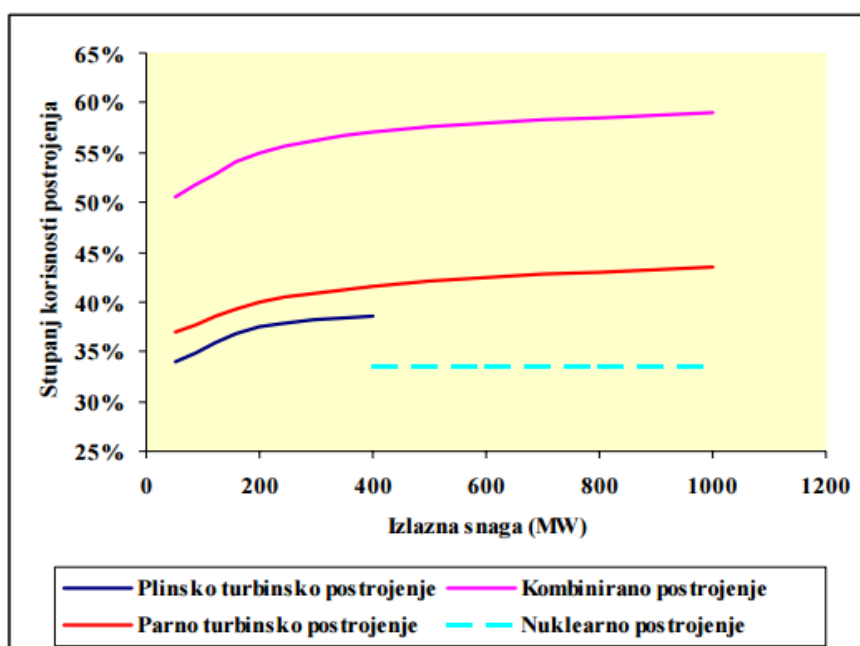


Slika 7. Shema kombiniranog postrojenja [11]



Slika 8. Kružni proces kombiniranog postrojenja u T-s dijagramu [11]

Kombinirana postrojenja imaju znatno veći stupanj korisnosti od ostalih vrsta postrojenja iz razloga što se toplina dovodi pri znatno većoj temperaturi u odnosu na parni proces i što se odvođenje topline odvija pri znatno nižoj temperaturi u odnosu na plinski proces. Na slici 9. prikazana je usporedba stupnja korisnosti svih vrsta termoenergetskih postrojenja uključujući i nuklearno postrojenje.



Slika 9. Usporedba stupnja korisnosti različitih termoenergetskih postrojenja

2.2. Termoelektrane na ugljen

Termoelektrane na ugljen su postrojenja u kojima se potrebna količina topline osigurava izgaranjem ugljena. Iako termoelektrane na ugljen imaju znatan negativan utjecaj na okoliš, razvoj i primjena novih tehnologija značajno pridonose smanjenju toga utjecaja (npr. mjere za smanjenje emisija dušikovih oksida, sumporova dioksida i čestica, odsumporavanje, filteri za uklanjanje čestica ili izdvajanje ugljikova dioksida). Većina električne energije u svijetu proizvodi se upravo u termoelektranama na ugljen.

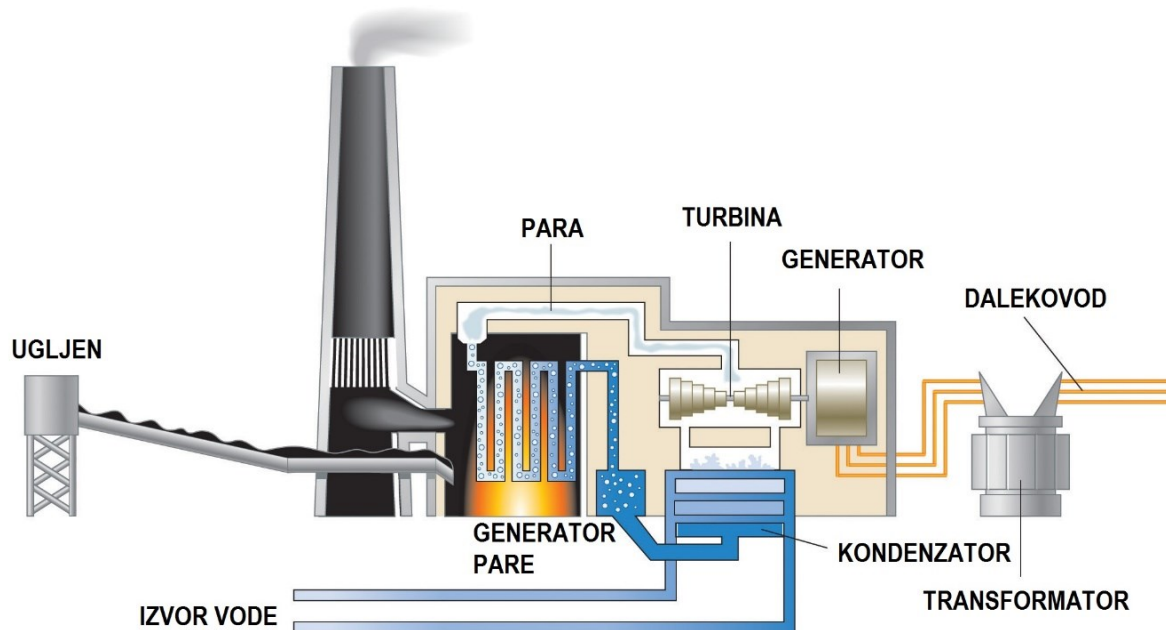
Prednosti:

- relativno jeftina električna energija
- zalihe ugljena dovoljne su za sljedećih 300 godina (ovisno o proizvodnji električne energije, odnosno o potrebama za električnom energijom)
- poznata i pouzdana tehnologija dobivanja, prerade i uporabe ugljena

Nedostaci:

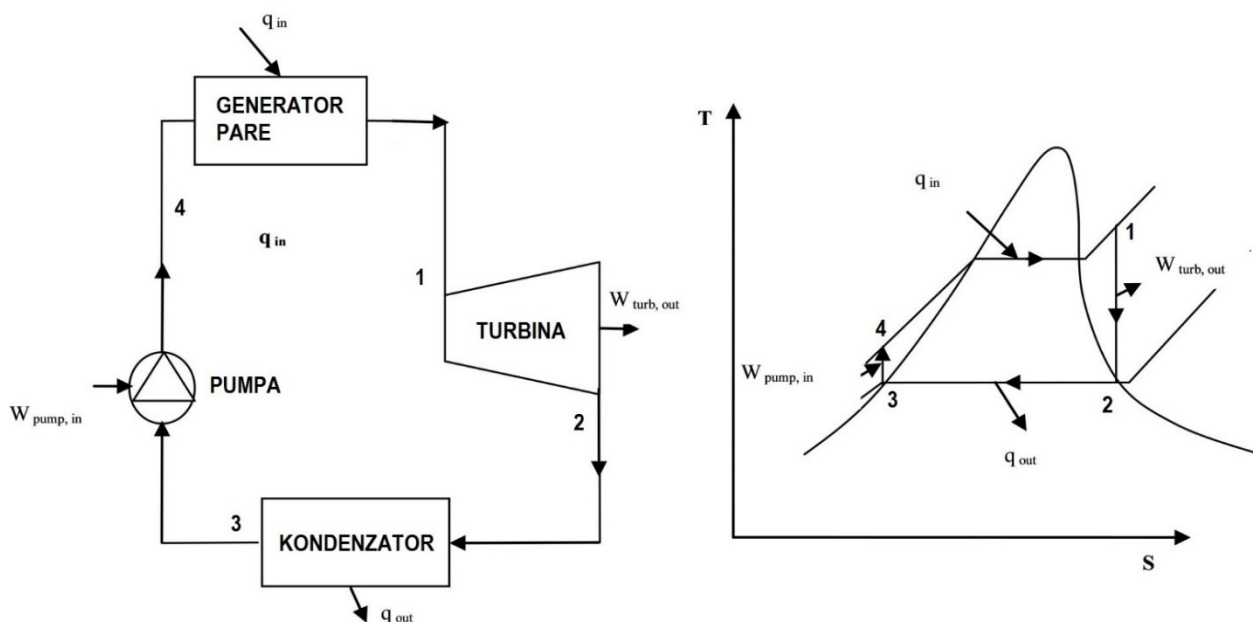
- nesreće u rudnicima ugljena
- velike količine ugljena potrebne za pogon elektrane
- iskapanjem rude i izgaranjem ugljena stvaraju se velike količine otpada koji može biti opasan kemijski i radijacijski
- emisije dušikovih i sumporovih oksida iz termoelektrana zaslužne su za stvaranje kiselih kiša, koje imaju izrazito negativan utjecaj na biljni i životinjski svijet
- emisija dušikova dioksida iz termoelektrana zauzima značajan udio u antropogenim emisijama stakleničkih plinova

Prikaz tipične termoelektrane na ugljen dan je na slici 10.



Slika 10. Jednostavni prikaz termoelektrane na ugljen [13]

Radi boljeg razumijevanja samih procesa u termoelektrani odnosno njenim dijelovima, u nastavku je prikazan T-s dijagram Rankineovog procesa koji se odvija u postrojenju. Ugljen sagorijeva u generatoru pare i proizvedena para se šalje u turbinu gdje ekspandira do određenog tlaka i temperature te s takvim stanjem ulazi u kondenzator. U kondenzatoru para kondenzira do tekućeg stanja i šalje se u pumpu u kojoj se tlači do parametara s kojima ulazi ponovno u generator pare čime ponovno započinje kružni ciklus.



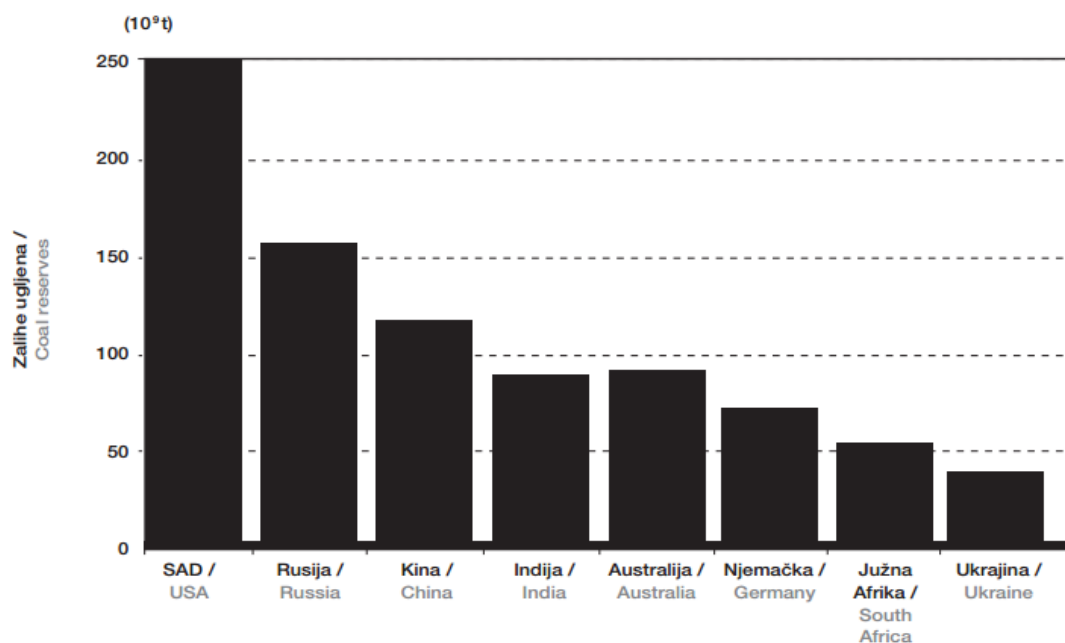
Slika 11. T-s dijagram Rankineovog procesa koji se odvija u termoelektrani

2.2.1. Ugljen i tehnologije čistog ugljena

Ugljen je u svijetu najšire rasprostranjeno fosilno gorivo koje pokriva 23 % potreba za primarnom energijom i 39 % za električnom. Izgaranjem ugljena proizvodi se i oslobađa u atmosferu oko 9 milijardi tona CO₂, a 70 % tog iznosa odnosi se na proizvodnju električne energije. Prema drugim procjenama proizvodi se 25 milijardi tona CO₂, a na električnu energiju otpada jedna trećina tog iznosa. [20]

Ugljen je nastao tijekom geološkog razvoja zemlje izmjenom organske tvari (biljnih ostataka) odnosno pretvorbom organske tvari, u posebnim biološkim, kemijskim i fizičkim uvjetima, u ugljen. Glavninu procesa pretvorbe čini karbonifikacija odnosno obogaćivanje organske tvari ugljikom i paralelno osiromašenje kisikom. Oko 70 % energetske postrojenja koriste kameni ugljen, dok ostali koriste smeđi ugljen i lignit.

Procjena svjetskih zaliha ugljena je oko 1000 milijardi tona raspoređenih prema slici 12.

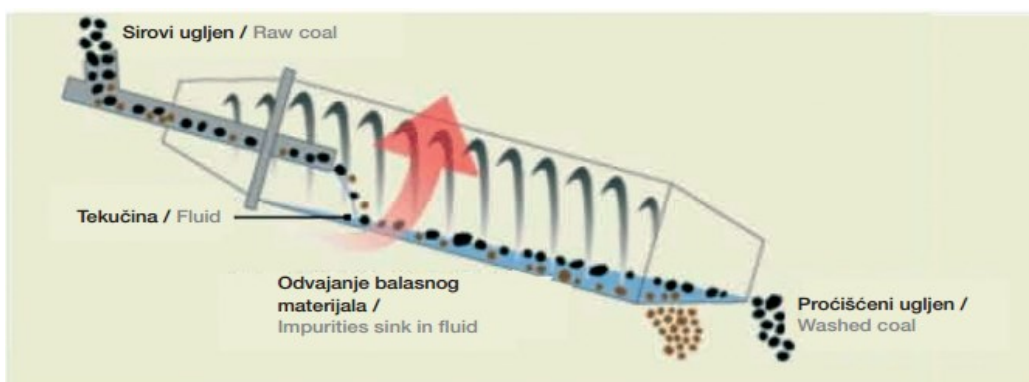


Slika 12. Globalne zalihe ugljena [20]

Također se procjenjuje da ugljena ima dovoljno za narednih 300 godina [20] što je moguće i produžiti zahvaljujući tehnološkim postignućima poput otkrića novih zaliha koja je omogućila nova metoda istraživanja te postignuća u rudarstvu. Opskrba ugljenom je sigurna jer su zalihe velike i biti će dostupne tijekom predvidive budućnosti, jednostavno je skladištenje u elektranama, proizvodnja nije ovisna o vremenu, nisu potrebni posebni transportni putevi za ugljen, nije ih potrebno štititi itd.

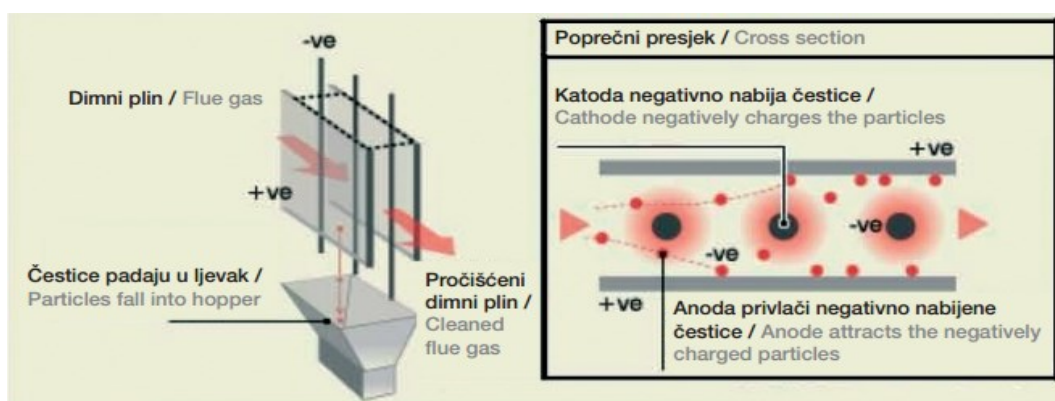
U cilju smanjenja štetnog utjecaja na okoliš i na ljudsko zdravlje te u cilju omogućavanja efikasnog iskorištenja svjetskih zaliha ugljena, razvijaju se nove tehnologije čistog ugljena. Čisti ugljen predstavlja ugljen očišćen od primjesa, ali i postupke kojima se uz smanjenje emisije drugih štetnih plinova smanjuje i emisija CO₂ u atmosferu. Tehnologije čistog ugljena dijele se na:

- Ispiranje ugljena – u razvijenim zemljama ovaj postupak je već uobičajen jer znatno smanjuje emisije pepela i SO_x te djeluje povoljno na proces izgaranja. Postupak se izvodi usitnjavanjem ugljena i slanjem u spororotirajući bubanj u kojem se nalazi tekućina veće gustoće na kojoj ugljen pluta, a teži mineralni i nesagorljivi sadržaji tonu na dno i odvođe se iz bubnja. Nakon toga se pročišćeni ugljen melje u finu prašinu za izgaranje. Postupak je prikazan na slici 13.



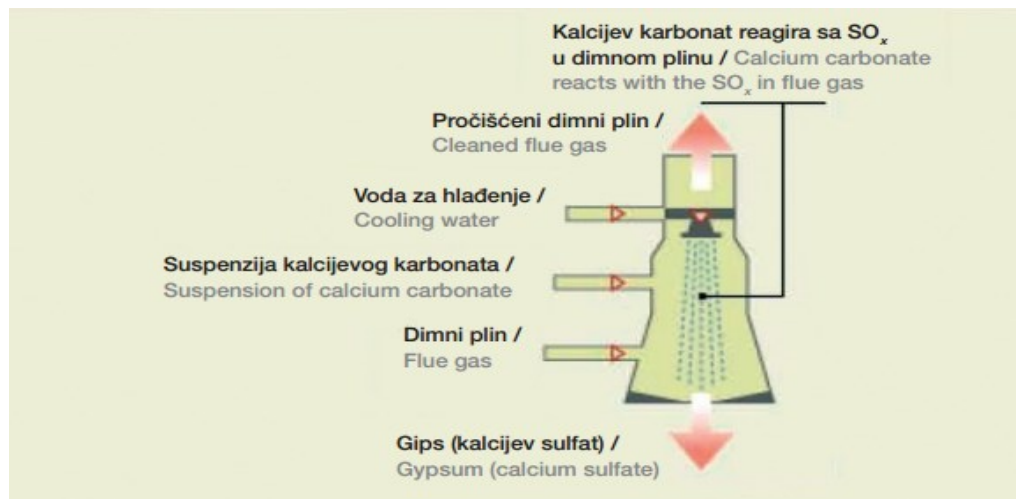
Slika 13. Ispiranje ugljena [20]

- Odvajanje krutih čestica – iz dimnih plinova moguće je odstraniti čak 99,7 % pepela korištenjem elektrostatskih filtera koji na principu elektrostatskog polja električki nabijaju čestice i sakupljaju ih na anodi. Osim elektrostatskih filtera, koriste se i vrećasti filtri. Postupak je prikazan na slici 14.



Slika 14. Odvajanje krutih čestica [20]

- Redukcija sumporovih oksida (odsumporavanje) – za odstranjivanje sumporovih oksida koji nastaju tijekom procesa izgaranja goriva koje sadrži sumpor, najčešće se koristi mokri postupak odsumporavanja prikazan na slici 15 kojim se može odstraniti do 95 % SO_x . Dimni plinovi reagiraju sa smjesom kalcijevog karbonata i vode pri čemu se stvara kalcijev sulfat tj. gips. Gips se odstranjuje i moguće ga je koristiti u građevnoj industriji.



Slika 15. Mokro odsumporavanje [20]

- Redukcija dušikovih oksida – redukcija emisije dušikovih oksida može se ostvariti tijekom izgaranja i to odgovarajućom konstrukcijom plamenika i stupnjevitim dovodom zraka i goriva. Time se smanjuju maksimalne temperature u jezgri plamena i također koncentracija kisika u zoni izgaranja. Sekundarne mjere se primjenjuju iza zone izgaranja, a uključuju selektivnu nekatalitičku redukciju tijekom koje se amonijak dovodi u generator pare na mjesto gdje su temperature iznad 850 °C, čime se postiže smanjenje emisije oko 70 %. Ako se uvede i katalizator odnosno provede i postupak selektivne katalitičke redukcije, ostvaraje se smanjenje emisije NO_x do 90 %. [20]

Što se stupnja iskoristivosti tiče, konvencionalne elektrane s podkritičnim parametrima pare rade sa stupnjem iskoristivosti od 36 – 39 %. Elektrane s nadkritičnim parametrima imaju iskoristivost do 47 %, a s ultra – nadkritičnim parametrima pare (>600 °C, > 300 bara) predviđaju stupnjeve iskoristivosti preko 50 %. [20]

2.3. Glavni dijelovi termoelektrane na ugljen

Kao što je prije spomenuto, glavni dijelovi svake termoelektrane na ugljen odnosno parno – turbinskog postrojenja su parna turbina, kondenzator, pumpa, generator pare i električni generator. Radi lakšeg razumijevanja rada elektrane i utjecaja pojedinih dijelova na njenu iskoristivost, svaki dio biti će detaljno objašnjen u nastavku.

2.3.1. Parna turbina

Parne turbine su toplinski strojevi u kojima se toplinska energija, sadržana u pari, pretvara u kinetičku energiju, a nakon toga u mehanički rad. Pretvorba energije odvija se na osnovi razlike ulaznih i izlaznih parametara pare odnosno tlaka i temperature. Veličina ulaznih i izlaznih parametara ovisi o ostalim dijelovima postrojenja, ponajviše o generatoru pare, a ne o samoj turbini koja samo koristi razliku energetske razine pare i tako proizvodi mehaničku energiju.

Parne turbine se mogu podijeliti prema raznim kriterijima. Prvi kriterij mogu biti vanjski uvjeti kojima turbina treba biti prilagođena, a drugi način pretvorbe ulaznog oblika energije u izlazni.

I. Vanjski uvjeti kojima turbina treba biti prilagođena:

1) Prema mjestu ugradnje:

- Stacionarne turbine
- Nestacionarne turbine

2) Prema razini ulazne energije:

- Turbine niskog tlaka do 1 MPa
- Turbine srednjeg tlaka do 9 MPa
- Turbine visokog tlaka do 22,4 MPa
- Turbine vrlo visokog tlaka > 22,4 MPa

3) Prema veličini snage:

- Turbine male snage do 10 MW
- Turbine srednje snage do 100 MW
- Turbine velike snage do 1000 MW
- Turbine vrlo velike snage > 1000 MW

4) Prema načinu i mjestu gdje se para odvodi iz turbine:

- Kondenzacijske turbine – para izlazi u kondenzator u kojem vlada podtlak

- Protutlačne turbine – para izlazi pod tlakom koji je veći od atmosferskog te se dalje koristi za pogon manjih turbina u sustavu ili za proizvodnju toplinske energije
- Kondenzacijske turbine s oduzimanjem pare – para djelomično izlazi kroz regulirana oduzimanja za potrebe pomoćnih potrošača, a preostali dio ide u kondenzator

5) Prema broju stupnjeva:

- Turbine s jednim stupnjem
- Turbine s više stupnjeva

II. Prema načinu pretvorbe energije:

1) Prema načinu rada:

- Akcijske turbine – pretvorba energije odvija se u statorskim lopaticama
- Reakcijske turbine – pretvorba energije odvija se djelomično u statorskim i djelomično u rotorskim lopaticama
- Akcijsko – reakcijske turbine

2) Prema smjeru strujanja pare:

- Aksijalne turbine
- Radijalne turbine
- Radijalno – aksijalne turbine

2.3.1.1. Toplinski proces u turbinskom stupnju

Pretvorba toplinske energije ekspanzijom pare u energiju pokretanja rotora turbine proizlazi kao rezultat strujanja pare kroz nepokretne sapnice ili statorske lopatice i pokretne rotorske lopatice rotora turbine. U struji pare nastaju gubici koji su obuhvaćeni stupnjem korisnosti turbine. Proračun i korisnosti statorskih i rotorskih lopatica kao i cijelog pretlačnog dijela turbine temelji se na osnovnim jednažbama teorije strujanja u kanalu. U teoriji strujanja idealnog fluida koriste se sljedeće osnovne jednažbe:

1. Jednažba stanja

Ako se radi o idealnom plinu, jednažba stanja ima oblik:

$$p \cdot v = R \cdot T \quad (1)$$

gdje je:

p – tlak [Pa]

v – specifični volumen [m^3/kg]

T – temperatura [K]

R – plinska konstanta [J/kgK]

Ova jednadžba koristi se za plinske turbine, a za pregrijanu vodenu paru koristi se jednadžba:

$$h = \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot p \cdot v + \text{konst.} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2)$$

$\kappa = 1,3$ za pregrijanu paru

Ova jednadžba vrijedi za sva područja pregrijane pare osim u blizini kritične točke

2. Jednadžba kontinuiteta

Prirast površine poprečnog presjeka kanala određen je sumom prirasta brzine istjecanja i prirastom specifičnog volumena, koji ovisi o termodinamičkoj promjeni stanja kod istjecanja.

$$\frac{dA}{A} = \frac{dv}{v} - \frac{dc}{c} \quad (3)$$

3. Jednadžba količine gibanja

$$p_1 \cdot v_1^\kappa = p_0 \cdot v_0^\kappa = p \cdot v^\kappa = \text{konst} \quad (4)$$

4. Jednadžba o očuvanju energije

$$h_0 + \frac{c_0^2}{2} + q_0 = h_1 + \frac{c_1^2}{2} + l_1 \quad (5)$$

gdje je:

h – specifična entalpija pare

$c^2/2$ – kinetička energija

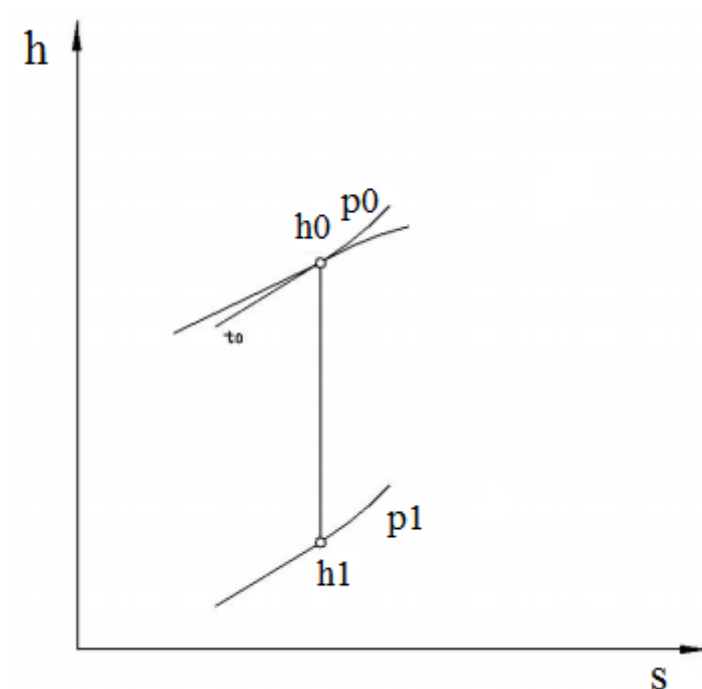
q – specifična toplina

l – specifični rad

Jednadžba se može koristiti za proračun sapnica kroz koje struji para. Za slučaj izentropskog strujanja pare kroz sapnice ($q = 0$), dobije se povećanje kinetičke energije pri ekspanziji pare:

$$\frac{c_1^2 - c_0^2}{2} = h_0 - h_1 \quad (6)$$

Na taj način promjena kinetičke energije struje pare može se odrediti pomoću h,s -dijagrama kao na slici 16.

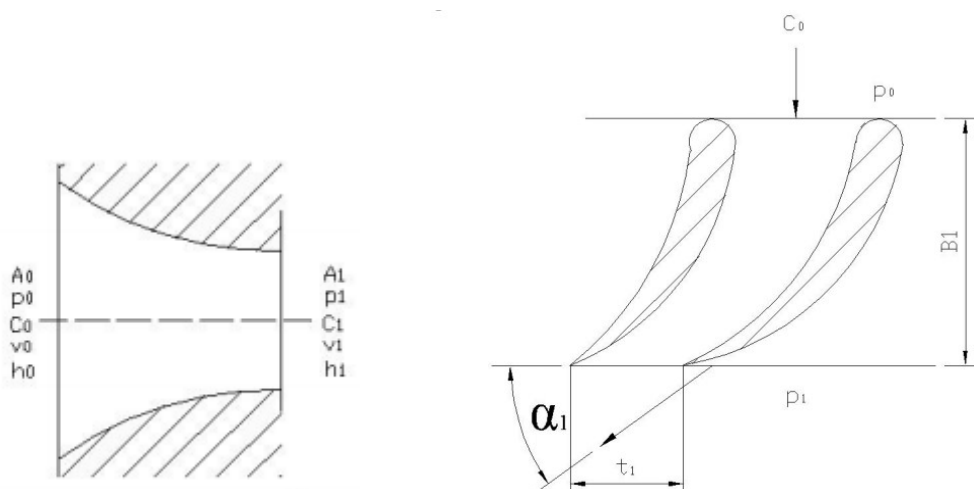


Slika 16. Promjena entalpije u h,s – dijagramu [10]

U parnim turbinama koriste se dvije vrste sapnica kroz koje struji para:

- Sužavajuće sapnice (konvergentne)

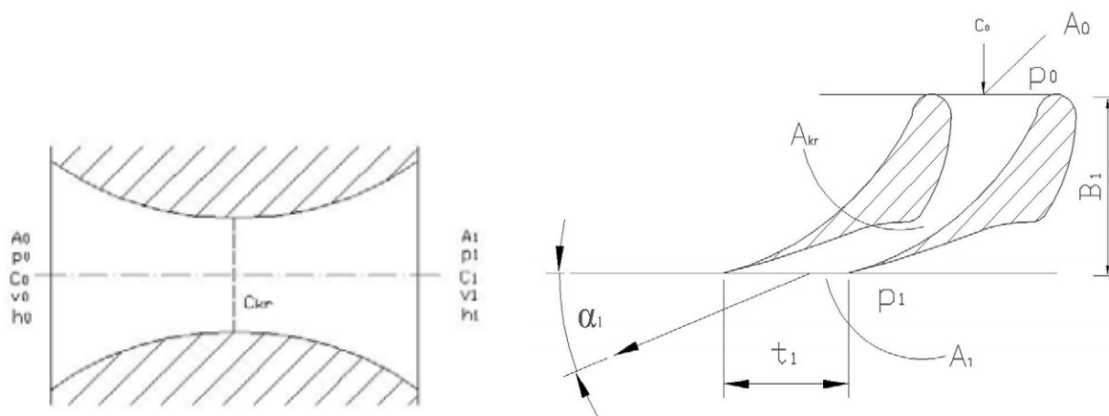
Ove sapnice primjenjuju se u turbinama u kojima se na izlazu želi dobiti brzina struje radnog medija manja ili jednaka brzini zvuka. Ovaj tip sapnice prikazan je na slici 17.



Slika 17. Sužavajuća sapnica [10]

- Sužavajuće – proširujuće sapnice

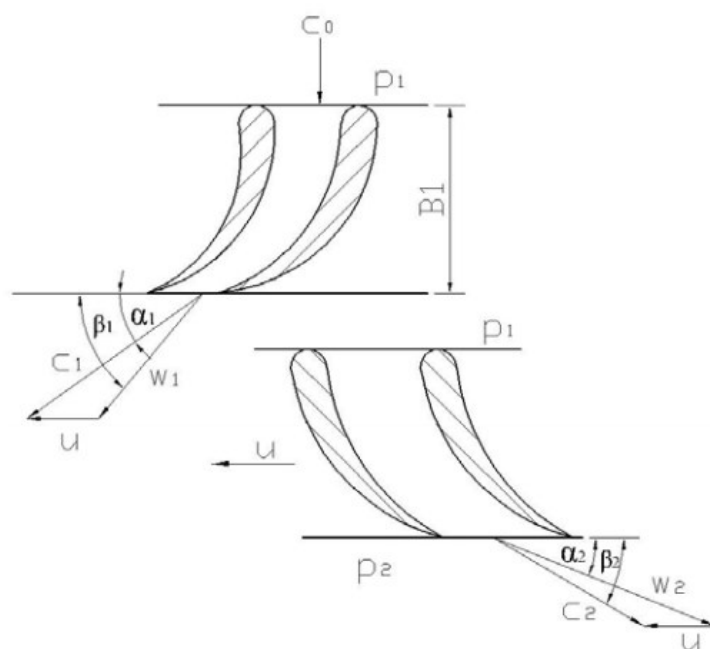
Ovaj tip sapnica koristi se kada se na izlazu želi dobiti brzina veća od brzine zvuka.



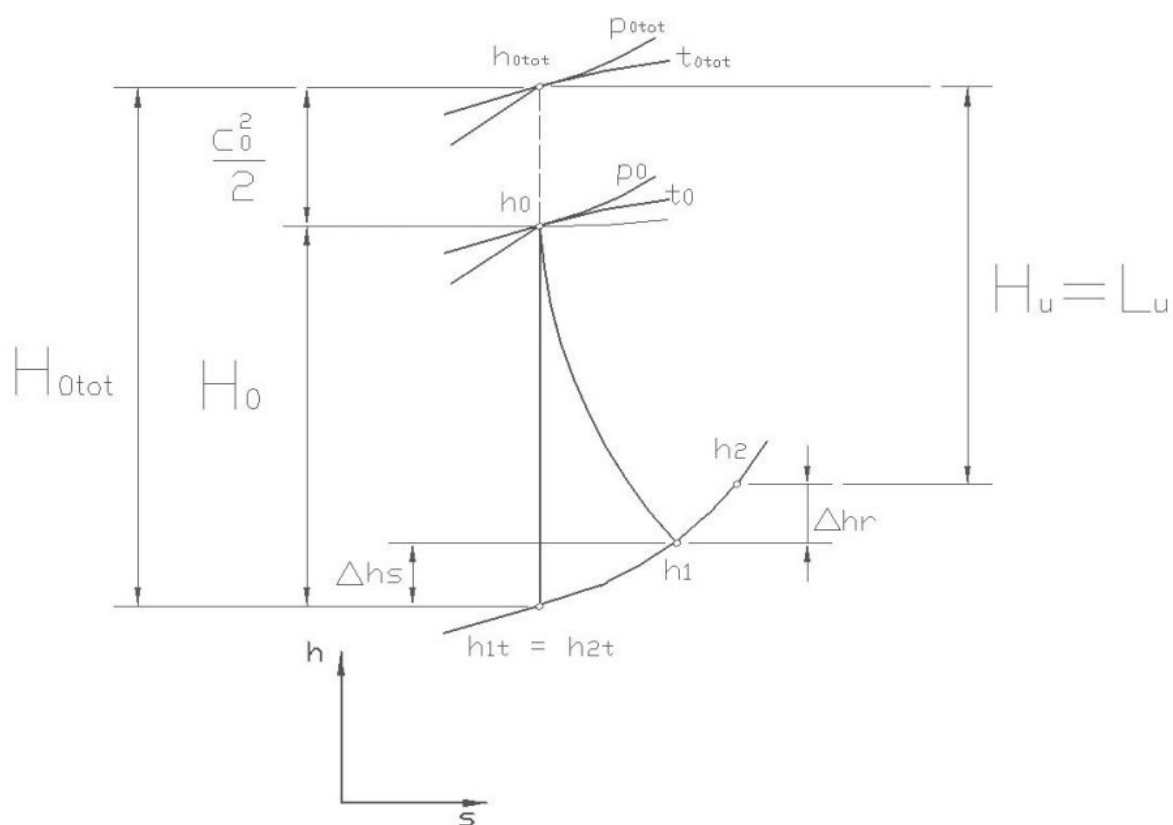
Slika 18. Sužavajuća – proširujuća mlaznica [10]

U stupnju turbine toplinska energija se pretvara u kinetičku energiju u staterskim lopaticama, a kinetička energija se pretvara u mehanički rad u rotorskim lopaticama, u obliku vrtnje rotorskih lopatica i rotora turbine. Prema pretvorbi energije razlikujemo akcijske i reakcijske stupnjeve turbine.

U čisto akcijskom stupnju cjelokupna ekspanzija pare odvija se u staterskim lopaticama, dok se u rotorskim mijenja samo smjer brzine te se tako dobiva obodna komponenta brzine vrtnje rotorskih lopatica. Kod akcijskog stupnja staterske lopatice su ugrađene u dijafragme, a rotorske lopatice u diskove odnosno rotorska kola. Na slici 19 prikazan je presjek staterskih i rotorskih lopatica akcijskog stupnja sa trokutima brzina, a na slici 20 prikazana je pretvorba energije.



Slika 19. Presjek statorskih i rotorskih lopatica akcijskog stupnja [10]



Slika 20. Pretvorba energije u akcijskom stupnju [10]

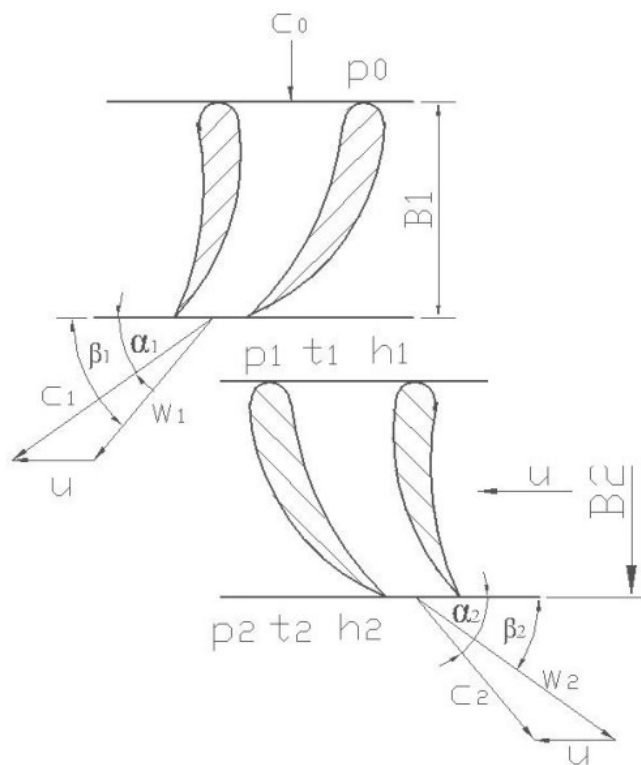
Danas se više ne primjenjuju čisti akcijski stupnjevi već para malo ekspandira i u rotorskim lopaticama. Odnos toplinskog pada u rotoru i ukupnog toplinskog pada turbinskog stupnja naziva se stupanj reakcije, a računa se pomoću formule:

$$\rho = \frac{H_{02}}{H_{01} + H_{02}} \approx \frac{H_{02}}{H_0} \quad (7)$$

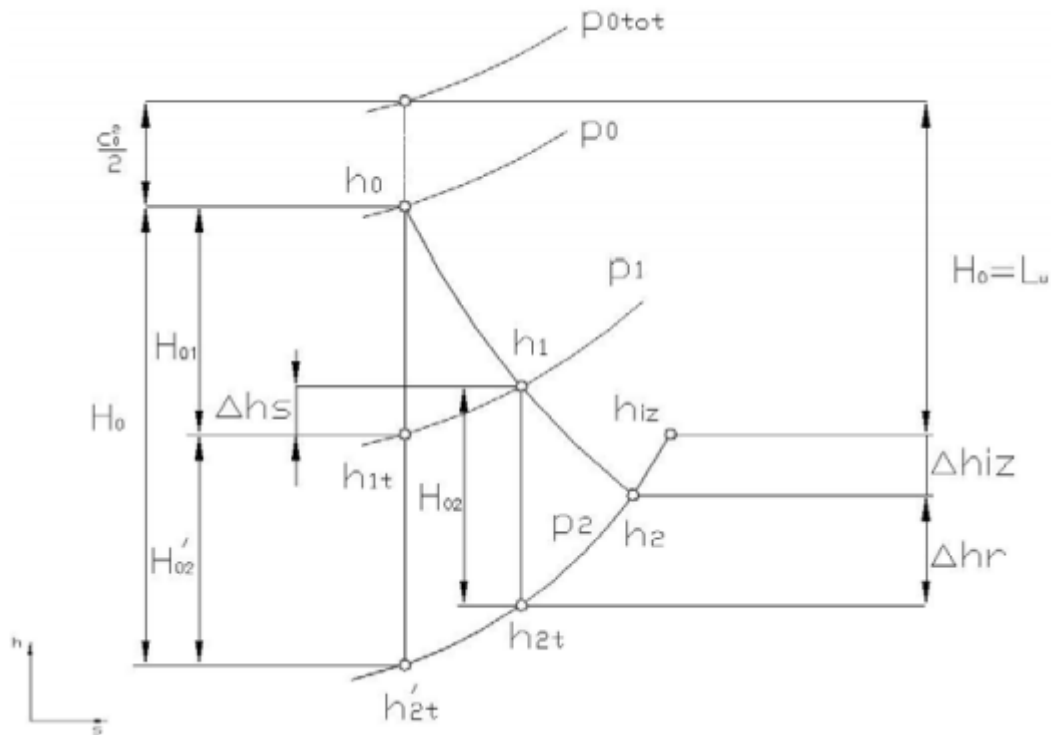
Najčešće vrijednosti stupnja reakcije su:

$$\rho = (5 - 15)\%$$

U reakcijskom turbinskom stupnju, od ukupnog toplinskog pada pola se prerađuje u statorkim lopaticama, a pola u rotorskim, pri čemu su profili statorkih i rotorskih lopatica potpuno jednaki. Statorkse lopatice su pričvršćene direktno u kućište, a rotorske su ugrađene na vratilo turbine. Na slici 21 prikazan je presjek statorkih i rotorskih lopatica reakcijskog stupnja.



Slika 21. Presjek statorkih i rotorskih lopatica reakcijskog stupnja [10]



Slika 22. Pretvorba energije u reakcijskom stupnju

Kako bi se iskoristivost turbine što preciznije odredila i u svrhu njenog povećanja, potrebno je poznavati mjesta najvećih gubitaka u turbini. Veličina gubitaka određena je razlikom teoretske i stvarne snage na vratilu turbine. Svi gubici u turbini dijele se u dvije skupine.

1) Unutarnji (neposredno utječu na strujanje radnog medija):

- Gubici u ulaznim ventilima u turbinu – pri ulasku u turbinu para prolazi kroz ventil svježeg pare i regulacijskog ventila i tu dolazi do pada tlaka
- Gubici u statorkim i rotorskim lopaticama – gubici kinetičke energije u sapnicama nastaju kod opstrujavanja profila, skretanjem struje, vrtloženja iza izlaznih bridova, graničnog sloja, gubitaka na krajevima lopatica, dok gubici u rotorskim lopaticama obuhvaćaju bridne gubitke, gubitke kroz zazor, gubitke zbog trenja strujanja, gubitke na krajevima lopatica i zbog skretanja struje te gubitke zbog prekrivanja lopatica.
- Gubici izlazne brzine – na izlazu iz rotora para ima određenu brzinu s kojom napušta stupanj. Da bi se ta brzina mogla iskoristiti kod višestupanjskih turbina, zazor između stupnjeva ne smije biti prevelik.
- Gubici trenja i ventilacije – nastaju zbog otpora na koji nailazi disk kad se okreće u parnom prostoru

- Gubici kroz unutarnje zazore – kod višestupanjskih turbina, svaki stupanj odvojen je dijafragmom u koju su ugrađene statorske lopatice. Pred dijafragmom tlak je veći od tlaka iza stjenke, a na mjestu kroz koje prolazi vratilo turbine nastaju gubici pare zbog propuštanja
- Gubici zbog vlažnosti pare – vlažna para je dvofazni medij koji se sastoji od parne i tekuće faze. Tekuća faza je u obliku sitnih kapljica i ima veću brzinu od parne faze i zato pod drugim kutom ulazi u rotorske lopatice te stvara gubitke
- Gubici na izlazu iz turbine

2) Vanjski (ne utječu na strujanje radnog medija):

- Gubici kroz vanjske labirintne brtve – radi smanjenja propusnosti pare na mjestima izlaza vratila iz kućišta ugrađuju se labirintne brtve
- Mehanički gubici – nastaju u ležajevima turbine zbog trenja, pogona regulatora brzine vrtnje i pumpe za ulje. Kod turbina velikih snaga ovi gubici iznose 0,6-1 % [10].

Poznavajući iznose svih gubitaka, može se odrediti unutarnji stupanj iskoristivosti parne turbine pomoću slijedećih izraza:

$$\eta_i = \frac{H_i}{E_0} \quad (8)$$

$$H_i = \frac{c_0^2}{2} + H_0 - \sum \Delta h \quad (9)$$

$$E_0 = \frac{c_0^2}{2} + H_0 - \Delta h_{iz} \quad (10)$$

Gdje je:

H_i – iskorišteni toplinski pad

$\sum \Delta h$ – suma svih gubitaka topline

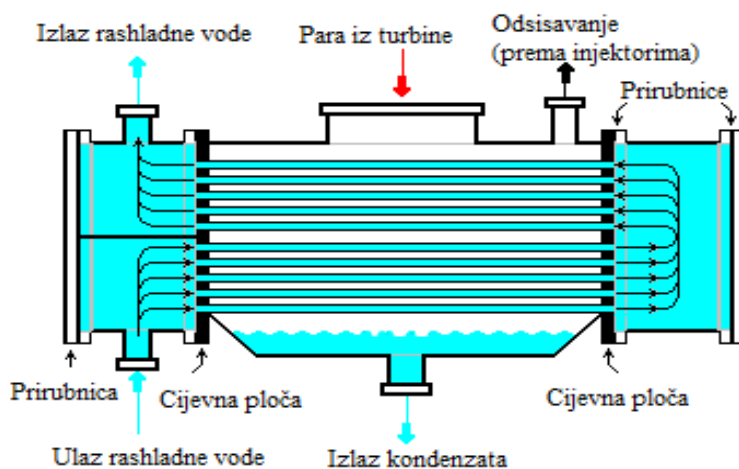
η_i – stupanj iskoristivosti na obodu lopatica

2.3.2. Kondenzator

Termodinamička iskoristivost parno – turbinskog postrojenja je veća što je niža temperatura pare iza posljednjeg stupnja turbine. Iskustveni podaci pokazuju da se kod promjene tlaka za 1 kPa iskoristivost turbinskog postrojenja mijenja za 1 %. Povećanje iskoristivosti omogućeno je najviše povećanjem toplinskog pada turbine i također osiguravanjem kondenzacije ispušne pare pri niskom tlaku. U tu svrhu koristi se kondenzator odnosno izmjenjivač topline kojemu je glavni zadatak da ispušnu paru iz turbine dovede u kapljevito stanje tj. kondenzat. Do kondenzacije pare dolazi pri dodiru s površinom koja ima nižu temperaturu od temperature zasićene pare pri zadanom tlaku u kondenzatoru. Kondenzacija se odvija odvođenjem topline, koja je prethodno iskorištena na isparavanje kapljevine, pomoću rashladnog medija. Prema vrsti rashladnog medija kondenzatori se dijele na vodene u kojima je rashladni medij voda, i zračne sa zrakom kao rashladnim medijem. Suvremena parno – turbinska postrojenja češće imaju vodene kondenzatore, dok zračni zbog manje efikasnosti i složenije konstrukcije nemaju širu primjenu.

Kondenzacijsko postrojenje sastoji se od kondenzatora i dodatnih dijelova koji osiguravaju njegov rad. Tako se kondenzacija ispušne pare koja dolazi iz turbine odvija u kondenzatoru, dovođenje rashladne vode u kondenzator osigurava se cirkulacijskom pumpom, dok kondenzatne pumpe služe za odvođenje kondenzata iz kondenzatora u sustav regenerativnog pregrijavanja napojne vode. Sustavi za odsis zraka, takozvani ejektor, služe za uklanjanje zraka koji ulazi u turbinu zajedno s parom kroz prirubničke spojeve, brtve i ostala mjesta.

Jednostavni prikaz kondenzatora vodenog tipa dan je na slici 23.



Slika 23. Presjek kroz parni kondenzator hlađen rashladnom vodom [13]

Kondenzator se sastoji od kućišta zatvorenog sa bočnih strana pomoću cijevnih stijena iz kojih cijevi ulaze u vodene komore. Voda ulazi u komoru kroz priključak i prolazi kroz cijevi smještene ispod pregrade. U komori voda prelazi u drugu sekciju cijevi koje su smještene iznad pregrade te se tako odvija drugi prolaz vode kroz cijevi. Nakon toga, voda se kroz izlazni priključak usmjerava u odvod. Broj prolaza je najčešće jedan do četiri, a sukladno tome odabire se i broj poprečnih pregrada. Para koja dolazi iz turbine kondenzira na površini kondenzatorskih cijevi kroz koje struji rashladna voda. Zbog naglog smanjenja specifičnog volumena pare, u kondenzatoru dolazi do uspostave niskog tlaka odnosno vakuuma koji je dublji što je niža temperatura i veći protok rashladnog medija. Odsis zraka iz kondenzatora, točnije smjere pare i zraka, provodi se ejektorom, dok se radi smanjenja volumena pare koja se odsisava, para hladi u hladnjaku zraka koji se nalazi u posebnom dijelu kondenzatora.

2.3.2.1. Toplinski procesi u kondenzatoru

U kondenzator ne dolazi čista para nego smjesa pare i plinova, ponajviše zraka. Omjer količine zraka i količine pare koja kondenzira naziva se relativni sadržaj zraka ε . Vrijednost ovog faktora ovisi o mnogobrojnim čimbenicima poput snage postrojenja, kvaliteti montaže, tipu postrojenja, opterećenjima, konstrukcijskim dimenzijama itd. Postojanje zraka u kondenzatoru utječe na toplinske procese koji se u njemu odvijaju kao i na raspodjelu parcijalnih tlakova u kondenzatoru. Na ulazu u kondenzator sadržaj zraka je nizak i parcijalni tlak pare je jednak tlaku u kondenzatoru. Tijekom strujanja smjese kroz kondenzator para kondenzira i sadržaj zraka raste, a parcijalni tlak pare opada u skladu s jednačbom:

$$p_p = \frac{p_k}{1 + 0,622 \cdot \varepsilon} \quad (11)$$

gdje je:

p_p – parcijalni tlak pare u smjesi

p_k – tlak u kondenzatoru

ε – relativni sadržaj zraka

Očito je tlak u donjoj polovici kondenzatora niži od tlaka u gornjoj polovici. Smanjenje tlaka prilikom prolaza kroz kondenzator je nužno radi uspostave toka pare i zraka. Razlika tlaka na ulazu i izlazu iz kondenzatora, $\Delta p_k = p_k - p_k'$, naziva se otpor kondenzatora s parne strane.

Tijekom odvijanja kondenzacije pare, temperatura u kondenzatoru se snizuje pa se i parcijalni tlak zasićene pare snižava i to zbog prisustva zraka i porasta njegovo relativnog sadržaja u smjesi, ali i zbog otpora strujanju pare u kondenzatoru.

Proces kondenzacije se dijeli u dva dijela što se utjecaja zraka tiče. Prvi, kod kojeg ne postoji veliki utjecaj zraka na temperaturu pare i drugi u kojem taj utjecaj naglo raste. Taj utjecaj u drugom dijelu kondenzacije očituje se smanjenjem temperature pare i u promjeni načina prijelaza topline sa smjese pare i zraka na rashladnu vodu. Zato svaki od ova dva dijela treba konstruirati uzimajući u obzir uvjete prijelaza topline i odvijanja kondenzacije. Prvi dio je područje masovne kondenzacije kod kojeg početna masa pare kondenzira uz gotovo konstantnu temperaturu, a drugi dio je hladnjak zraka u kojem završava proces kondenzacije. Zbog sniženja parcijalnog tlaka i temperature zasićene pare što je uzrokovano prisustvom zraka i otporom kondenzatora, dolazi do pothlađenja kondenzata od temperature zasićene pare na ulazu u kondenzator i temperature kondenzata na izlazu iz kondenzatora. Pothlađenje kondenzata dovodi do gubitka topline, koji se troši na zagrijavanje kondenzata te dolazi do porasta količine kisika u kondenzatu što izaziva koroziju cijevi. Efikasan način izbjegavanja pojave pothlađenja je ugradnja hladnjaka zraka.

2.3.2.2. Konstrukcija kondenzatora

Najvažniji dio kondenzatora su kondenzatorske cijevi koje se, radi otpornosti na koroziju, izrađuju od legura obojenih metala na osnovi bakra, mesinga te krom-nikal nehrđajućeg čelika. Sve cijevi zajedno čine cijevni snop na kojeg se prilikom konstruiranja postavljaju određeni zahtjevi :

- Maksimalno moguće povećanje površine aktivnog presjeka za strujanje pare
- Uspostava konstantne brzine prostrujavanja pare
- Organizacija najkraćeg i direktnog puta smjese pare i zraka prema mjestu odsisavanja
- Hvatanje i odvođenje kondenzata na međurazinama po visini snopa
- Uspostavljanje površine kondenzata na dnu kondenzatora
- Slobodan pristup pare u donji dio kondenzatora ispod cijevnog snopa na mjesto sakupljanja kondenzata itd

Cijevni snop sastoji se od dva glavna dijela : osnovni snop u kojem se odvija masovna kondenzacija pare uz nepostojanje zraka, i snop hladnjaka zraka, gdje se kondenzacija odvija manjom brzinom, a kondenzat koji nastaje je pothlađen. Radi sniženja temperature smjese pare i zraka, na snop hladnjaka zraka smjesa dolazi samo nakon prolaza kroz osnovni snop. Također, kroz cijevi hladnjaka prolazi rashladna voda niže temperature.

Kondenzatorske cijevi se učvršćuju u cijevne stijene. Načini učvršćenja moraju osigurati nepropusnost i trajnost spoja. Najčešće se to postiže uvaljavanjem. Radi osiguranja čvrstoće cijevi od opasnih vibracija i savijanja, ugrađuju se cijevne međustijene tj. pregrade koje se pričvršćuju za kućište kondenzatora.

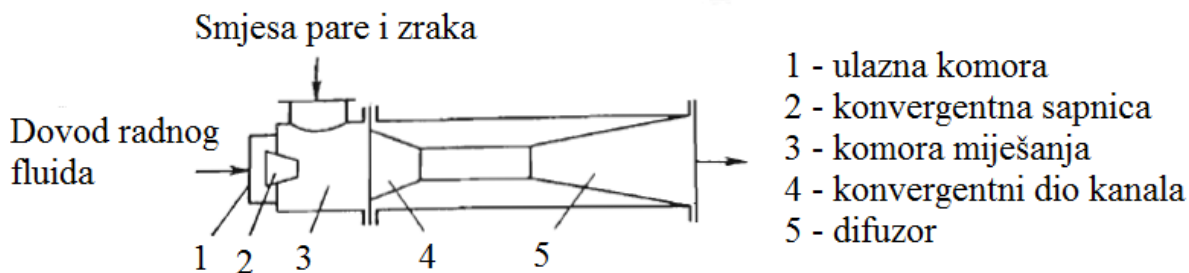
Normalni rad kondenzatora ostvaruje se uz pravilnu eksploataciju. Usisavanje atmosferskog zraka, zaprljanje cijevi kondenzatora, loš rad hladnjaka protočne vode i drugi uzroci sprječavaju postizanje dubokog vakuuma u kondenzatoru. Konstrukcija elemenata kondenzatora, njegov spoj s turbinom i ugradnja su uvjetovani potrebom ostvarivanja odgovarajuće nepropusnosti, koja sprječava ulazak zraka i rashladne vode u parni prostor kondenzatora. Kod modernih kondenzatora ulazni dio (grlo) pričvršćuje se za ispušno kućište turbine zavarivanjem, što isključuje usisavanje atmosferskog zraka i omogućuje kruto povezivanje kondenzatora i niskotlačnog kućišta turbine. Kućište kondenzatora izrađuje se zavarivanjem limova od ugljičnog čelika. Kod modernih kondenzatora cijevne stijene se također zavaruju za kućište radi ostvarivanja nepropusnosti. Poklopci vodenih komora, koji se također učvršćuju za stijene vodenih komora zavarivanjem, brtve se gumenim brtvama i velikim brojem priteznih vijaka.



Slika 24. Prikaz tipičnog kondenzatora u termoelektrani [14]

2.3.2.3. Ejektori

Ejektori su dijelovi kondenzatora koji služe za odsis zraka iz kondenzatora i održavanje traženog vakuuma. Kod parno – turbinskih postrojenja koriste se parni i vodeni ejektori te centrifugalne zračne pumpe. Shema tipičnog ejektora prikazana je na slici 25.



Slika 25. Shema ejektora

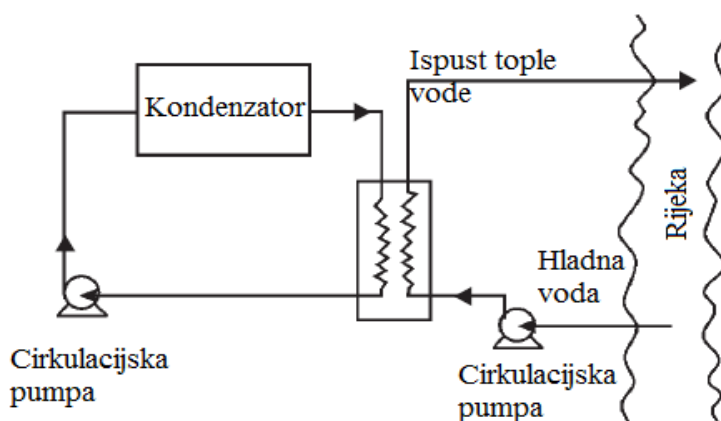
Radni fluid dovodi se pod tlakom u ulaznu komoru, otkuda se kroz konvergentnu sapnicu s visokom brzinom usmjerava u komoru miješanja, koja je spojena s parnim prostorom kondenzatora. Struja radnog fluida povlači smjesu pare i zraka iz prostora u sužavajućem dijelu kanala promjenjivog presjeka i dalje dolazi u difuzor, u kojem dolazi do zaustavljanja toka i pretvorbe kinetičke energije u potencijalnu. Zbog toga je tlak na izlazu veći od atmosferskog te dolazi do konstantnog udaljavanja smjese pare i zraka iz kondenzatora.

U parno – turbinskim postrojenjima najčešće se koristi parni ejektor koji može biti jednostupanjski, dvostupanjski ili trostupanjski. Jednostupanjski ejektor postiže vakuum od 0,073 do 0,080 MPa i primjenjuje se za brzi odvod zraka iz kondenzatora kod upuštanja turbine. Dvostupanjski i trostupanjski ejektori koriste se za postizanje dubljeg vakuuma (4 – 5 kPa) i primjenjuju se radi potrebe osiguravanja sigurnog rada turbine kod dubokog vakuuma. Današnji ejektori opremljeni su uređajima za mjerenje količine odstranjenog zraka što omogućava bolju kontrolu zračne nepropusnosti kondenzatora. Osnovni razlozi lošeg rada parnih ejektora, koji dovode do narušavanja vakuuma u turbini su mali protok pare zbog zagušenja sapnice ejektora ili pada tlaka radne pare, povišenje temperature smjese pare i zraka zbog nečistoća u hladnjaku ejektora, recirkulacija zraka između stupnjeva ejektora i ostalo. Najčešći uzroci kvara ejektora su „parenje“ ili „prepunjavanje“ ejektora. Parenje je narušavanje rada ejektora do kojeg dolazi zbog nepotpune kondenzacije u hladnjacima uz nedovoljan protok rashladne vode, a prepunjavanje je potapanje hladnjaka ejektora kondenzatom zbog neispravnog rada sustava za odvođenje kondenzata u kondenzator.

2.3.3. Rashladni tornjevi

Zbog postizanja dubokog vakuuma u kondenzatoru potrebne su velike količine rashladne vode. Pošto je zagrijavanje rashladne vode obično 8 do 12 °C, a latentna toplina kondenzacije u prosjeku 2250 do 2400 kJ/kg, to znači da za 1 kg pare koja kondenzira treba 50 do 70 kg rashladne vode. Također je u prosjeku za proizvodnju 1 kWh električne energije potrebno u klasičnoj termoelektrani oko 130 l vode, a u nuklearnoj 200 l, pri čemu se više od 95 % te količine troši na hlađenje kondenzatora [12].

Opskrba kondenzatora rashladnom vodom može se vršiti na nekoliko načina. Najekonomičniji je otvoreni sustav kod kojeg se u kondenzator stalno dovodi svježa voda. Izvor vode za takve sustave je najčešće rijeka, more ili veliko jezero. Iz izvora se voda dovodi cirkulacijskom pumpom, prolazi kroz kondenzator i zatim se zagrijana voda ponovno ispušta u izvor. Jednostavna shema otvorenog rashladnog sustava prikazana je na slici 26.



Slika 26. Shema otvorenog rashladnog sustava

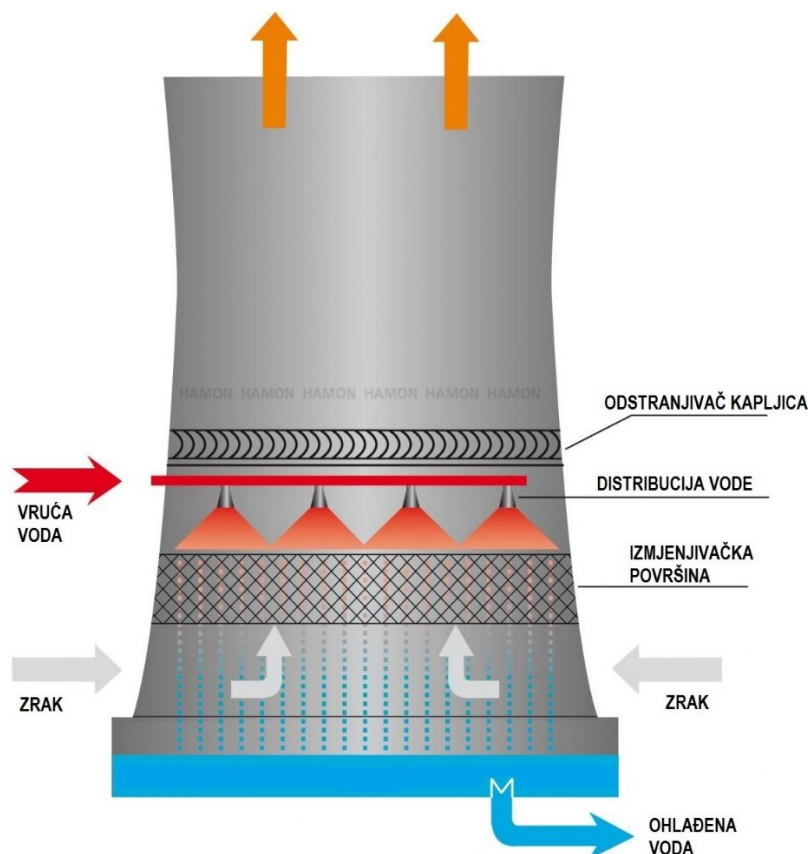
Korištenje otvorenog rashladnog sustava je prilično ograničeno i mogućnost njegove primjene se iz godine u godinu smanjuje ponajviše zbog toga što su elektrane sve veće i potreban im je veliki protok rashladne vode, ali i zbog ekoloških problema zagrijavanja vode s otpadnim vodama iz elektrane. Iz tih razloga, sve više se koriste zatvoreni rashladni sustavi kod kojih se voda koja je prošla kroz kondenzator hladi i ponovno koristi. Razlikuju se dva tipa zatvorenih rashladnih sustava: akumulacijski i sustavi s rashladnim tornjem. Kod akumulacijskih sustava, izvor rashladne vode je akumulacija, izgrađena uz rijeku. Zahvat cirkulacijske vode izvodi se uz branu, a mjesto ispuštanja određuje se na temelju lokalnih uvjeta. Hlađenje zagrijane vode rashladnim tornjevima koristi se kad se termoelektrane velike snage grade uz velike gradove ili u sušnim krajevima gdje postoji deficit rashladne vode.

2.3.3.1. Podjela rashladnih tornjeva

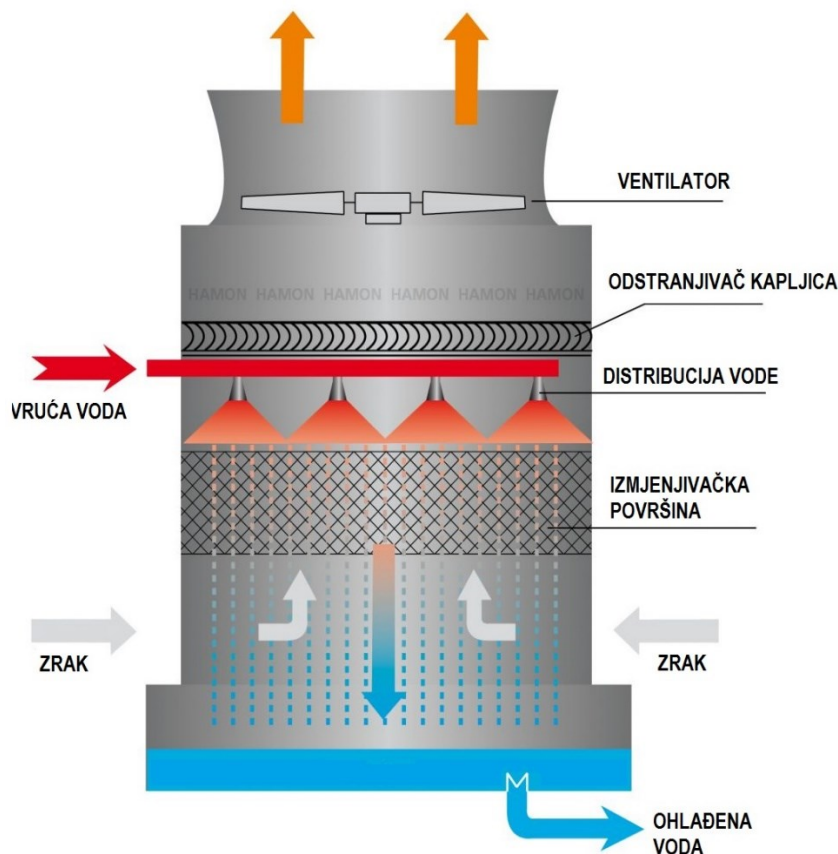
Tipovi rashladnih tornjeva s obzirom na rashladni medij su:

- Vodeni rashladni tornjevi
- Zračni rashladni tornjevi
- Vodeno – zračni rashladni tornjevi

Kod vodenih rashladnih tornjeva voda se pumpa na vrh rashladne sekcije i zatim struji i rasprskava se preko ispune tornja uz istovremeno strujanje zraka u suprotnom smjeru. Kako dio vode isparava, zrak se zagrijava i vlaži dok se preostala voda hladi. Strujanje zraka omogućuje uzgon (prirodna ventilacija, slika 27) ili ventilatori (prisilna cirkulacija, slika 28).



Slika 27. Strujanje zraka prirodnom ventilacijom



Slika 28. Strujanje zraka prisilnom ventilacijom

Odabir tipa rashladnog tornja i rashladnog sustava vrši se u prvom redu kako bi se postiglo traženo hlađenje uz prihvatljivi utjecaj na okoliš i naravno uz minimalnu cijenu. Rashladni sustav je jedan od najvažnijih dijelova termoenergetskog postrojenja jer njegove karakteristike imaju značajan utjecaj na iskoristivost postrojenja. Ako rashladni sustav ne osigura dovoljno hlađenje, raste tlak na izlazu iz turbine zbog čega su ograničenja i mogućnosti koje se postavljaju na rashladni sustav bitan faktor u analizi troškova i iskoristivosti sustava.

Glavni razlog korištenja zatvorenih rashladnih sustava je smanjenje utjecaja na okoliš kroz smanjeno korištenje površinskih vodotokova te njihovo niže toplinsko opterećenje. Kod zatvorenih sustava koristi se samo 2 do 4 % one količine vodotoka koji bi trebao za otvoreni sustav [12]. Ostali čimbenici uvjetovani okolinom su potrošnja vode, polucija vlage, korištenje zemlje, buka i narušavanje izgleda okoliša. Prednost otvorenih sustava je manja uporaba zemljišta, mala razina buke u odnosu na zatvorene sustave i minimalno narušavanje izgleda okoliša.

2.3.3.2. Vodeni rashladni toranj

Kod vodenog rashladnog tornja odvedena toplina se odvodi u atmosferu preko rashladne vode koja je u kontaktu sa zrakom. Hlađenje se odvija na principu isparavanja male količine vode i prijelazom topline s vode na zrak. Voda koja je zagrijana u kondenzatoru pumpa se u distribucijsku sekciju koja se nalazi pri vrhu tornja. Voda se potom slijeva zbog gravitacije preko ispune u tornju u bazen dok paralelno zrak struji kroz ispunu što rezultira hlađenjem vode na temperaturu okoliša i prijelazom latentne topline na zrak. Tipovi ispune dijele se u dvije kategorije. Ispuna s rasprskavanjem razbija vodu u kapljice i tako pojačava isparavanje, dok ispunu filmskog tipa stvara tanki film vode na povećanim površinama također radi pojačanja isparavanja.

Kao što je prije spomenuto, postoje tri načina za dovođenje zraka u ispunu odnosno postoje tri osnovna tipa rashladnih tornjeva:

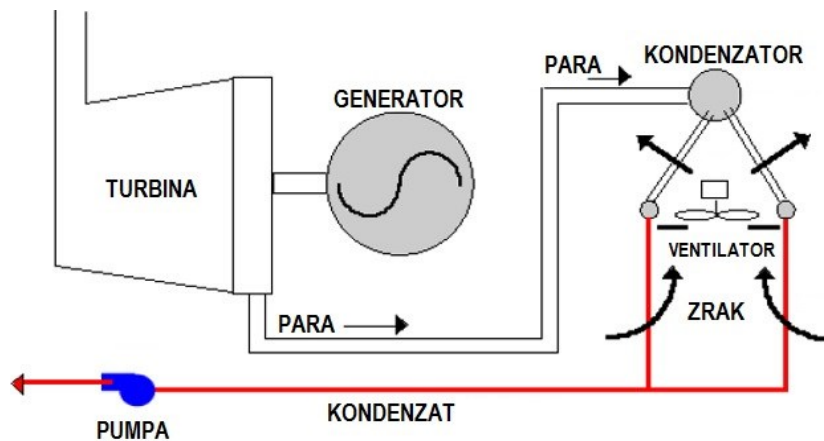
- 1) Rashladni tornjevi s prisilnom cirkulacijom (uzgonom) zraka
- 2) Rashladni tornjevi s prirodnom cirkulacijom (uzgonom) zraka
- 3) Rashladni tornjevi s prirodnom cirkulacijom (uzgonom) zraka potpomognutom ventilatorom

Kod rashladnih tornjeva s prisilnom cirkulacijom ventilatori se koriste za osiguranje određenog masenog protoka zraka koji je skoro pa neovisan o vanjskim uvjetima. Kod rashladnih tornjeva s prirodnim uzgonom, maseni protok zraka kroz ispunu je rezultat toplinskog uzgona. Iako kod ovog tipa tornja nema investicije ugradnje ventilatora i troška snage za njegov rad, toranj ima veći plašt i zbog toga je znatno skuplji, a i maseni protok zraka kroz ispunu je u ovom slučaju jako ovisan o stanju okoline. Kod tornjeva kod kojih je prirodni uzgon potpomognut ventilatorom, pojačan je efekt dimnjaka plašta tornja, smanjene su dimenzije tornja i poboljšana stabilnost masenog protoka zraka kao i cijena instalacije ventilatora.

2.3.3.3. Zračni rashladni toranj

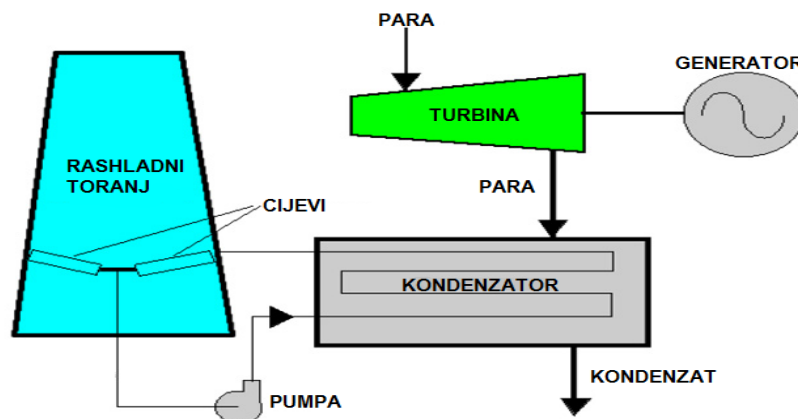
Zrakom hlađeni rashladni tornjevi koriste izmjenjivače s povećanim površinama za odvođenje topline s vode ili pare koja cirkulira kroz cijevi u atmosferu. Okolišni zrak struji preko vanjskih površina cijevi i povećanih površina čime se poboljšava konvektivni prijelaz topline. Dvije su glavne konstrukcije takvih tornjeva:

- Direktni sustav – para iz ispušnog kućišta niskotlačne turbine ustrujava u kanale izmjenjivača topline i kondenzira hlađenjem pomoću zraka. Gustoća pare u uvjetima vakuuma na izlazu iz turbine je mala što zahtjeva velike kanale za strujanje pare pa ta veličina određuje veličinu direktnog kondenzacijskog sustava.



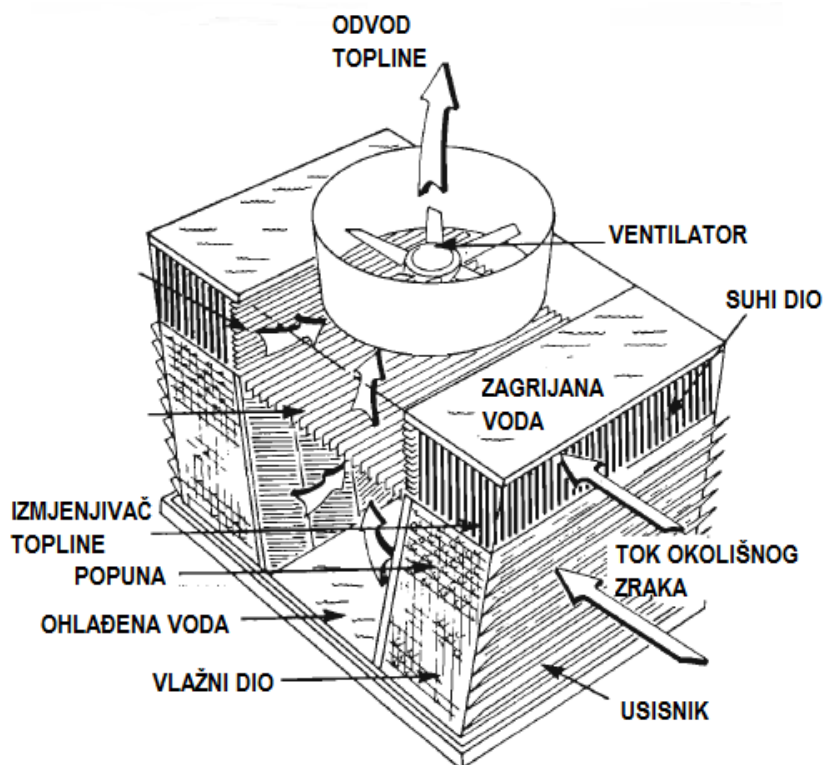
Slika 29. Shema sustava s rashladnim tornjem s direktnim sustavom

- Indirektni sustav – koristi se dodatni međukrug kako bi se izbjegao prijelaz pare u velike kanale. Dva tipa takvih sustava su s površinskim kondenzatorom i s kondenzatorom miješanjem.



Slika 30. Shema sustava s rashladnim tornjem s indirektnim sustavom

Vodeno – zračni rashladni tornjevi imaju prednosti oba tipa rashladnih tornjeva. Zračni dio osigurava hlađenje kroz duže vremensko razdoblje bez potrošnje vode, dok se tijekom perioda kada je vanjska temperatura visoka hlađenje potpomaže s vodom. Postoje razne izvedbe ovog tipa rashladnog tornja: odvojeni vodeni i zračni toranj, kombinirani tornjevi s paralelnim ili serijskim tokom zraka kroz suhi ili vlažni dio itd.

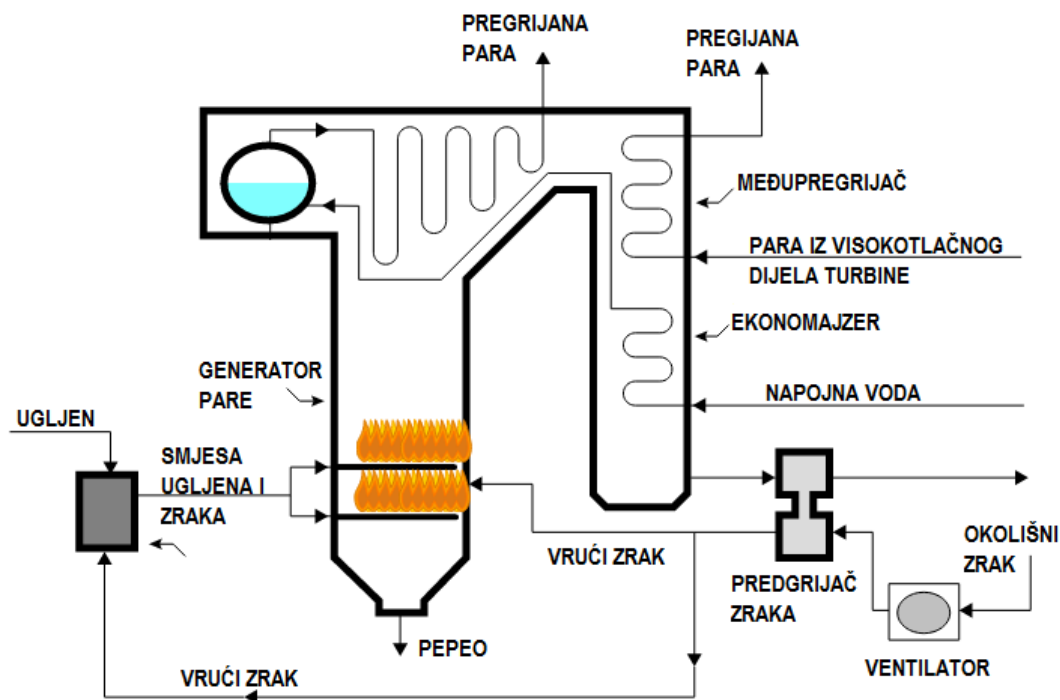


Slika 31. Vodeno – zračni rashladni toranj [12]

Kod suhih rashladnih tornjeva ne postoji direktni kontakt između vode i zraka, i popuna je zamijenjena izmjenjivačem topline. Kod rashladnog tornja s neposrednim kontaktom vode i zraka treba stalno dodavati određenu količinu rashladne vode, koja iznosi 3 % od ukupnog protoka (1% za kompenzaciju isparavanja i 2 % za održavanje koncentracije soli na prihvatljivoj razini), a to je ekvivalentno približno 1 l za kWh. [12] Kod zračnih rashladnih tornjeva toga nema. Također, zračni rashladni tornjevi mogu se primjenjivati u slučajevima kada ne postoji izvor vode za isparivački tip tornja. Cijena zračnog tornja je približno dva puta veća od cijene vodenog tornja, a također dimenzije zračnog tornja trebaju biti veće. Povećanje cijene je uzorkovano zamjenom jeftine popune izmjenjivačima topline i potrebom korištenja tornja većih dimenzija. Promjena entalpije zraka u zračnom tornju treba biti manja nego i isparivačkom pa je potreba za protok zraka veća.

2.3.4. Generator pare

Generator pare ili parni kotao je dio termoelektrane koji služi za proizvodnju pare određenog tlaka i temperature, koja služi kao radni fluid za pogon parnih turbina te naposljetku za proizvodnju električne energije. U razvoj generatora pare se konstantno ulaže jer potrebe za električnom energijom i težnja za što ekonomičnijim energetske postrojenjem također konstantno rastu. Danas se sve više grade nadkritični generatori pare kod kojih se voda zagrijava na konstantnom tlaku većem od kritičnog tlaka odnosno većem od 22,1 MPa. Kod nadkritičnih generatora pare nema podjele na parnu i tekuću fazu jer je gustoća obje faze jednaka, dok kod podkritičnih generatora pare postoje svije faze, tekuća i plinovita, koje imaju različiti specifični volumen. Podkritični generatori pare imaju bubanj za odvajanje tekuće i parne faze u kojem se tekućina šalje na recirkulaciju kroz isparivač, a para u pregrijač. Nadkritični generatori pare se obično rade s jednim prolazom i voda se pumpa napojnom pumpom kroz izmjenjivačke dijelove generatora pare te se predaje turbini.



Slika 32. Shema generatora pare [13]

2.3.4.1. Podjela generatora pare

Generatori pare dijele se prema raznim uvjetima:

1) *Prema smještaju:*

- Stacionarni
- Pokretni (brodski, lokomotivni)

2) *Prema namjeni:*

- Energetski
- Industrijski
- Glavni
- Pomoćni

3) *Prema vrsti goriva i načinu izgaranja:*

- Za izgaranje krutih goriva na nepomičnim rešetkama
- Za izgaranje krutih goriva na mehaničkim (nepomičnim) rešetkama
- Za izgaranje otpadnih gorivih tvari (komunalni otpad, biomasa)
- Za izgaranje krutog goriva u letu
- Za izgaranje tekućeg goriva
- Za izgaranje plinovitih goriva
- Za kombinirano izgaranje više vrsta goriva
- Za izgaranje goriva u fluidiziranom sloju
- Za korištenje otpadne topline dimnih plinova iz plinskih turbina i motora

4) *Prema vrsti cirkulacije:*

- S prirodnom cirkulacijom
- S prisilnom cirkulacijom

5) *Prema konstrukcijskom obliku tlačnih dijelova:*

- Vodocijevni
- Dimnocijevni
- Kosocijevni
- Strmocijevni
- Kutnocijevni cilindrični
- Sekcijski
- S jednim ili više bubnjeva

2.3.4.2. Dijelovi generatora pare

Osnovni dijelovi svakog generatora pare su:

1) **Prostor za izgaranje goriva generatora pare** (ložište) sa svim uređajima za dovod goriva i zraka kao i za odvod dimnih plinova – u ložištu se kemijska energija goriva pretvara u toplinsku energiju dimnih plinova. Veličina i oblik ložišta kao i ostale karakteristike ovise najviše o vrsti goriva, veličini jedinice, načinu dovoda goriva i zraka za izgaranje itd. Osnovni zadatak ložišta je osiguranje pravilnog i potpunog izgaranja goriva u optimalnim uvjetima tj. s minimalnim pretičkom zraka. Proces izgaranja goriva mora završiti u ložištu. Dimni plinovi prenose svoju toplinsku energiju strujanjem na ogrjevnim površinama izmjenjivača topline. Toplinska energija dimnih plinova predaje se prema slijedećem redoslijedu: cijevni sustav ogrjevnih površina isparivača vode, pregrijača pare, zagrijača ili predisparivača vode i ogrjevne površine zagrijača zraka. Redoslijed može biti i drugačiji, ovisno o toplinskom proračunu jedinice. Dimni plinovi struje dimnim kanalima u sklopu generatora pare i izlaze pomoću prirodne ili prisilne cirkulacije u atmosferu. Zrak se dovodi na rešetku ili u gorionike pomoću ventilatora svježeg zraka, a dimni plinovi se odvođe iz jedinice pomoću ventilatora dimnih plinova.

2) **Sustav izmjenjivača topline:**

- Isparivač vode – osnovni dio generatora pare je ogrjevna površina isparivača vode. To je površina koja je s jedne strane u dodiru s dimnim plinovima, a s druge strane s vodom i mješavinom vode i vodene pare. Veličina te površine računa se kod stacionarnih generatora pare na strani dimnih plinova, a kod brodskih jedinica na strani vode. Isparivači su cijevi povezane komorama i bubnjem tako da se odvija normalni optok vode i pare. Kod generatora pare s prirodnim optokom moraju do određene visine bubnja bubanj i cijevni sustav isparivača biti ispunjeni vodom, a iznad tog dijela bubnja nalazi se parni prostor. Kod generatora pare s prisilnim optokom voda i para često se izravno odvajaju u cijevnom sustavu isparivača bez bubnja. Najniži i najviši vodostaj u generatoru pare moraju biti jasno određeni, jer je to oznaka stanja vode i pare u samoj jedinici. Time se sprječava izravan dodir dimnih plinova visoke temperature s ogrjevnim površinama isparivača koje nisu s druge strane hlađene mješavinom vode i vodene pare.
- Pregrijač pare – sklop ogrjevnih površina izmjenjivača topline u kojem se pregrijava vodena para iz zasićenog stanja do određene temperature pregrijanja. Upregrijaču se

također suši para koja na ulazu u pregrijač sadrži određeni udio vodenih čestica. Ogrjevne površine pregrijača pare izvede se u obliku snopova čeličnih bešavnih cijevi, a prema potrebi i od legiranog čelika, smještenih bilo u ložištu bilo u vodovima dimnih plinova. Kod većih jedinica s visokim pregrijanjem pare, ogrjevne površine podijeljene su na višedijelova. Toplina se konvekcijom i zračenjem prenosi s dimnih plinova na vodenu paru koja struji cijevima pregrijača.

- Zagrijač i predisparivač vode – sklop ogrjevnih površina izmjenjivača topline u kojem se voda zagrijava ili djelomično isparava. Za niže pogonske tlakove ogrjevne površine zagrijača vode izvedene su od rebrastih cijevi, dok su za visoke tlakove izvedene od čeličnih bešavnih cijevi u obliku cijevnih zmija. Temperature zagrijavanja vode u zagrijačima kreću se od 25 – 50 °C ispod temperature zasićene pare. Često se u zagrijaču voda zagrijava i do temperature isparavanja, a može preispariti do 25 %. [15]
- Zagrijač zraka – ogrjevnim površinama izmjenjivača topline zagrijava se zrak za izgaranje na određenu temperaturu. Ogrjevne površine zagrijača zraka mogu se izvesti kao limeni pločasti zagrijači, cijevni zagrijači, lijevane rebraste cijevi i kao specijalne izvedbe. Zrakom koji se zagrijava prijenosom topline od dimnih plinova suši se i zagrijava gorivo i stvaraju se povoljni uvjeti izgaranja u ložištu generatora pare.

3) Pomoćni uređaji u generatoru pare:

- Armatura generatora pare – u ovu skupinu opreme uključeni su svi pomoćni dijelovi potrebni za potpunu izgradnju jedinice i normalan rad. Gruba armatura obuhvaća pomoćne uređaje ložišta, kontrolna vrata, zaklopke, otvore za nadgledanje, razne lijevane dijelove itd. Fina armatura obuhvaća dijelove bitne za sigurnost pogona i rada jedinice poput vodokaznih uređaja, termometara, nanometara, sigurnosnih i povratnih ventila, odzračnih ventila, ventila za puštanje u pogon, raznih priključaka za instrumente i uređaje za regulaciju i automatiku itd.
- Nosiva čelična konstrukcija generatora pare – osigurava izgradnju cijele jedinice u jedinstvenu cjelinu i povezuje pojedine dijelove generatora pare. Nosiva konstrukcija jedinice preuzima opterećenje koje nastaje ugradnjom svih dijelova u generator pare (ložište sa svim uređajima, ogrjevne površine izmjenjivača topline i ostali dijelovi). Najčešće je nosiva konstrukcija izvedena od normalnih valjanih profila ili od zavarenih lamela konstrukcijskih čelika.
- Ozid i izolacija generatora pare – sprječavaju prodor vanjskog zraka u ložište i kanale jedinice i dopuštaju minimalne toplinske gubitke. Vatrostalni i izolacijski materijali

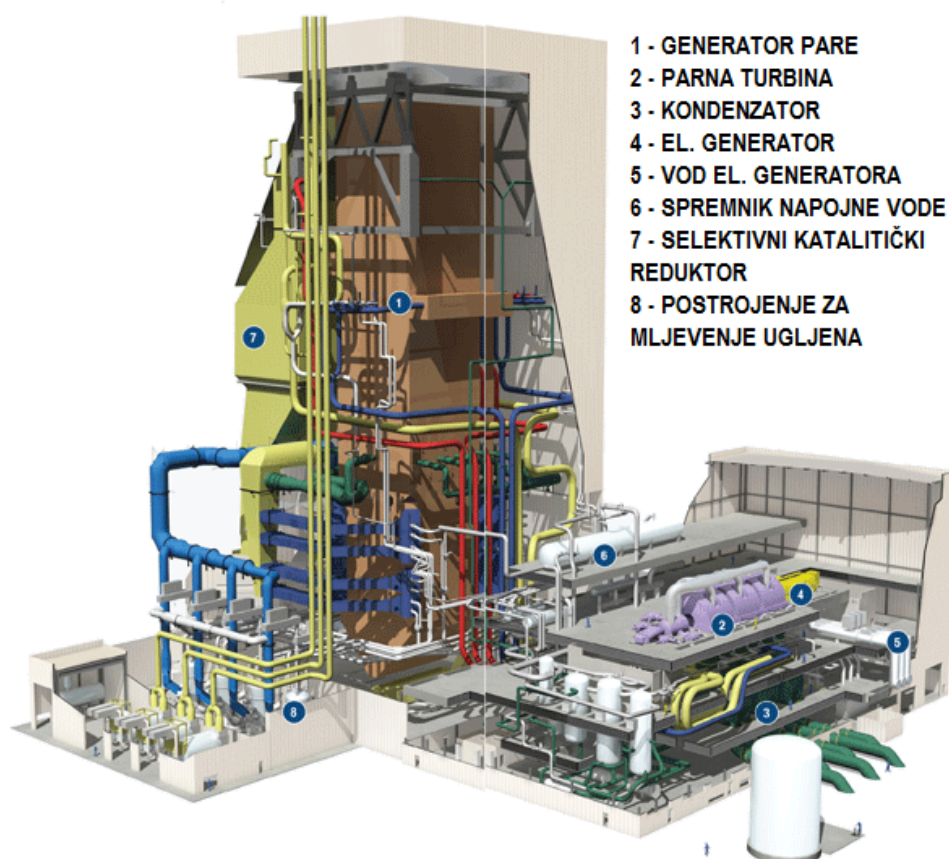
biraju se na osnovi toplinskih i mehaničkih naprezanja koja se javljaju zbog temperaturnih stanja u pojedinim područjima generatora pare. Postoje dvije izvedbe generatora pare: normalna ili teška izvedba i laka ili izolacijska izvedba. Normalna izvedba je ozid koji se sastoji od vatrostalnih (šamotnih) opeka i svodova, a između sloja opeke i vanjskog ozida nalazi se izolacijski međusloj. Izolacijska izvedba primjenjuje se kod generatora pare većeg učina gdje su stijene ložišta potpuno prekrivene ogrjevnim površinama izvedenim od zavarenih cijevi. Iza tih cijevnih stijena smješten je sloj izolacijskog materijala (staklena ili mineralna vuna), a generator pare kao cjelina prekriven je limenom oplatom.

4) Uređaji izvan generatora pare:

- Postrojenje za pripremu napojne vode – ovo postrojenje sastoji se od termičke i kemijske pripreme vode. U kemijskoj pripremi odstranjuju se štetni sastojci u vodi kao što su soli, anorganske i organske kiseline, mehaničke nečistoće itd. Uvjeti kojima napojna voda mora odgovarati određeni su u generatoru pare temperaturom pregrijanja, radnim tlakom, toplinskim opterećenjem ogrjevnih površina, vrstom generatora pare i ostalim uvjetima. Postoje određeni propisi i smjernice za čistoću i kvalitetu napojne vode koji obvezuju izvođača i korisnika generatora pare da održava određeno stanje napojne vode. U termičkoj pripremi vode napojna voda predgrijava se u predgrijačima (visokotlačni i niskotlačni predgrijači vode) te se otplinjuju štetni plinovi u napojnoj vodi, prvenstveno O_2 i CO_2 .
- Uređaji za napajanje generatora pare – ovi se uređaji sastoje od napojnih pumpi koje se najčešće izvode kao turbopumpe ili elektropumpe; u sklop tog dijela pomoćnih uređaja ulaze napojni cjevovodi te sigurnosna i pogonska armatura. Napajanje se regulira u sklopu regulacije generatora pare. Sigurnosna opskrba generatora pare napojnom vodom je najbitniji uvjet sigurnosti pogona te zato u svakoj zemlji postoje vrlo strogi propisi o izgradnji i veličini napojnih pumpi.
- Postrojenje za transport i pripremu goriva – sastoji se od niza transportnih uređaja ovisno o vrsti goriva (kruto, tekuće ili plinovito gorivo), o zahtjevima za sigurnost pogona, kao i o smještajnim uvjetima generatora pare i njegovih pomoćnih uređaja. Postrojenja za transport i pripremu goriva čine u termoenergetskim postrojenjima, osobito kod krutih goriva, složeno i veliko postrojenje.
- Uređaji za čišćenje dimnih plinova – filteri dimnih plinova mogu biti izvedeni na osnovi mehaničkog odvajanja čestica pepela i balastnih materija tj. djelovanja centrifugalne

sile na čestice pepela u dimnim plinovima, ili kao elektrofiltri na osnovi djelovanja elektrostatičkog elektriciteta. Općenito se dijele u četiri skupine: mehanički suhi filtri, mehanički vlažni filtri, elektrosuhi filtri i elektrovlažni filtri.

- Uređaji za odvod troske i pepela – tim uređajima odstranjuju se troska i pepeo kao i ostale balastne materije iz ložišta generatora pare. Izvode se kao mehanički, hidraulički i pneumatski uređaji.
- Oprema za instrumentaciju, regulaciju i automatiku generatora pare – za ispravan rad i pogon generatora pare ugrađuje se oprema za upravljanje i regulaciju kojoj su osnovne zadaće uskladiti dovedenu energiju u obliku goriva s potrebnom toplinskom energijom koji proizvodi generator pare, uskladiti odnose goriva i zraka da proces izgaranja u ložištu bude najpovoljniji, održavati tlak u ložištu stalnim u svim pogonskim uvjetima, održavati temperaturu pregrijanja stalnom i održavati sigurnu opskrbu napojnom vodom.



Slika 33. Prikaz nadkritičnog postorjenja sa svim dijelovima

3. TERMOELEKTRANA MEDUPI

Nadkritična termoelektrana Medupi koja će se sastojati od šest jedinica, svaka kapaciteta 794 MW, je najveća termoelektrana ikad naručena od Eskoma i biti će prva bazna elektrana izgrađena u zemlji u zadnjih 20 godina. Eskom je također naručio i sklopio ugovore s izvođačima za još jednu identičnu termoelektranu nazvanu Kusile.

Ukupni kapacitet ovih elektrana čini 25 % trenutne proizvodnje električne energije u zemlji. Ugovore za turbine za obje elektrane dobila je svjetska kompanija Alstom koja je odgovorna za parne turbine, električne generatore, povezane s zrakom hlađenim kondenzatorima, te za svu pomoćnu opremu vezanu za turbine i napojnu vodu. Ostali važniji izvođači su Hitachi (kotlovi), SPX (zračni pregrijači, tlačni dijelovi) i Clyde Bergemann (čišćenje kotlova).

Medupi se nalazi 15 kilometara od mjesta Lephalale u Limpopo pokrajini u Južnoj Africi. Mjesto je nekada bilo farma površine 2500 ha koja se koristila za ispašu stoke, a danas je u vlasništvu tvrtke Exxaro.



Slika 34. Lokacija termoelektrana Medupi i Kusile [6]

Južna Afrika ima obilne količine ugljena pa je lako odabran za pogonsko gorivo novih kapaciteta. Ugljen dominira kao gorivo za proizvodnju električne energije još od 1880. godine. Južna Afrika proizvede prosječno 260 milijuna tona ugljena godišnje što ju čini sedmim najvećim proizvođačem ugljena u Svijetu.

Oko 77 % primarne energije u zemlji pokriva ugljen i ta se situacija neće bitno promijeniti u idućem desetljeću. Rezerve ugljena procjenjuju se na 53 milijarde tona. Ugljen za termoelektranu Medupi biti će isporučen od tvrtke Exxaro koja je najveći dobavljač ugljena u

zemlji. Tvrtka će isporučivati 14,6 milijuna tona ugljena godišnje kroz idućih 40 godina. Exxaro će potrošiti oko 60 milijuna eura za proširivanje Grootegeluk rudnika na sjeveru Južne Afrike kako bi zadovoljio potrebe za Medupi. Većina rudnika ugljena u Južnoj Africi je površinski miniran ugljen loše kvalitete s velikim udjelom pepela i sumporovih spojeva. Ugljen će se stoga dodatno pročišćavati prije spaljivanja u elektrani.



Slika 35. Stroj za iskapanje ugljena u rudniku Grootegeluk [21]

Eskom je proveo brojna istraživanja i detaljne studije kako bi odabrao najbolju lokaciju za novu elektranu. Kriteriji koje je lokacija morala zadovoljavati su:

- Dostupnost i pristupačnost primarnih izvora tj. vode i ugljena
- Pristupačnost postojećoj električnoj mreži
- Ekološka prihvatljivost
- Razumni troškovi proizvodnje

Područje Waterberg i Lephalale u blizini postojeće elektrane Matimba procijenjeno je najpovoljnijim za izgradnju nove termoelektrane zbog:

- Blizine primarnog izvora energije – ugljena
- Svojstva tog ugljena su dobro poznata zbog iskustva s njim u Matimba elektrani
- Konkurentne cijene ugljena
- Niskog utjecaja na okoliš

3.1. Tehnički podaci

Energetski blok svake od šest jedinica u Medupiju sastoji se od nadkritičnog kotla, parne turbine, električnog generatora i kondenzatora. Para se pregrijava na 560 °C i tlači na 241 bar. Nakon međupregrijanja proizvodi se para od 570 °C i 50,5 bara. Protok pare pri nominalnom opterećenju iznosi 617 kg/s. Na vanjskoj temperaturi od 40 °C i brzini vjetra od 9 m/s, bruto izlazna snaga svakog bloka je 764 MW. Pod takvim uvjetima tlak kondenzatora je 141 mbar. U usporedbi s ostalim elektranama u Južnoj Africi koje su građene uglavnom 1970-ih godina, iskoristivost nadkritičnih elektrana poput Medupija je 20 do 25 % veća, dok je emisija CO₂ smanjena za 10 % po kWh proizvedene energije.



Slika 36. Gradilište elektrane Medupi [7]

3.1.1. Generator pare u Medupi elektrani

Generatori pare su jednoprolazni, nadkritični oblika tornja, proizvođača Benson. U elektrani se nalazi šest identičnih generatora pare koji imaju mogućnost sagorijevanja širokog raspona različitih vrsta ugljena s različitim udjelima pepela. Parametri pare i ostale komponente su:

- pregrijana para: 564 °C / 258 bar (25,8 MPa)
- međupregrijana para: 572 °C / 53 bar (5,3 MPa)
- Kapacitet pare po kotlu: 2288 t/h
- Gorivo: bitumenski ugljen
- Svaki kotao ima 30 NO_x plamenika sa stupnjevitim izgaranjem
- 3 napojne pumpe ugrađene su s konstantnom brzinom motora i promjenjivom brzinom spojke, svaka snage 20 MW
- Pumpa za kondenzat promjenjive frekvencije
- Plamenik



Slika 37. Generatori pare elektrane Medupi u izgradnji [7]

Na slikama ispod prikazana je trenutna faze izgradnje druge jedinice generatora pare u elektrani Medupi. Generator pare se sastoji od velikog broja izmjenjivačkih površina koje se sastoje od još većeg broja cijevi.



Slika 38. Izmjenjivačke površine i cijevi generatora pare



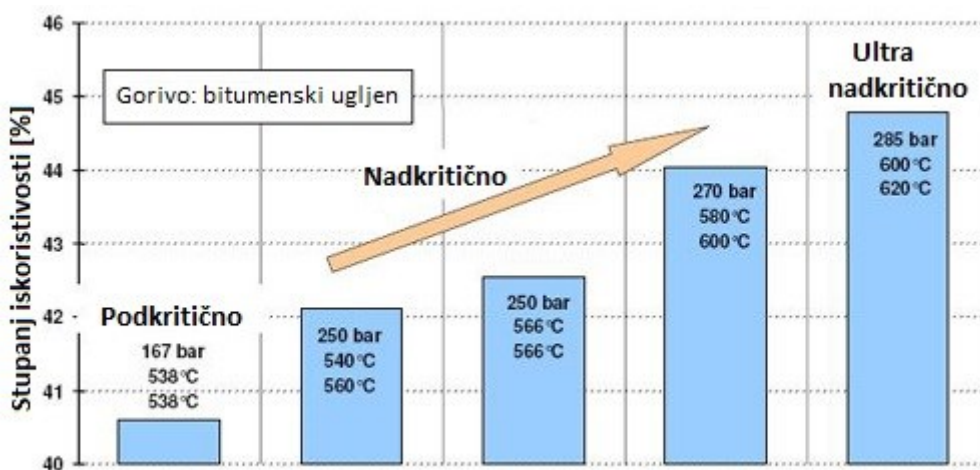
Slika 39. Konstrukcija za dovoz ugljena do kotla [21]



Slika 40. Sakupljači pepela

3.1.1.1. Nadkritični generatori pare

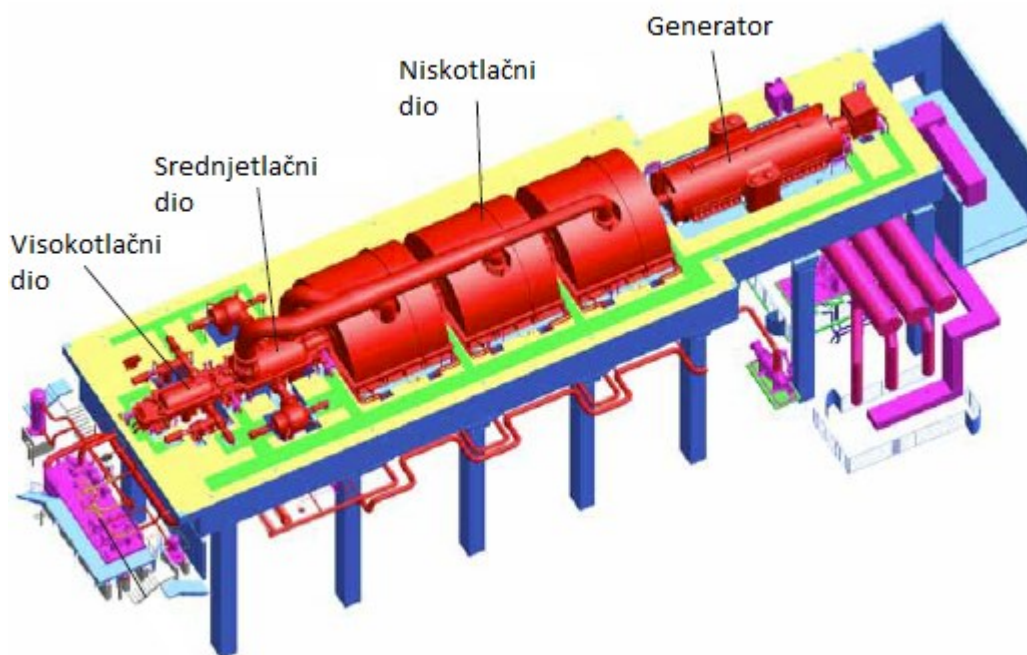
Tipični nadkritični generatori pare su kotlovi s jednim prolazom, gdje voda pumpana napojnom pumpom prolazi kroz izmjenjivačke elemente generatora pare i predaje se turbini na konačnoj temperaturi bez recirkulacije. Umjesto da se para proizvodi pomoću kipuće vode i koristi za pokretanje turbine, nadkritični kotao radi na toliko visokom tlaku (većem od 221,2 bara) da u fluidu nema razlike između tekuće i parne faze već se dobije faza nazvana nadkritični fluid. Nadkritični fluid okreće turbinu koja pomoću generatora stvara električnu energiju. Nakon prolaska kroz turbinu, tlak pada ispod kritične točke i fluid ponovno postaje mješavina parne i tekuće faze te dolazi u kondenzator. Nadkritični proces zahtijeva manju količinu goriva od tipičnog kotla s bubnjem za odvajanje faza, što čini kržni ciklus čini puno učinkovitijim od ciklusa u elektranama s podkritičnim parametrima pare. Velike podkritične elektrane koje rade s tlakom od 170 bara i temperaturnim režimom 540 °C imaju učinkovitost od 38 %, dok nadkritične elektrane s tlakom od 250 bara i temperaturnim režimom 600/615 °C rade s učinkovitošću od 42 %. Najmodernije nadkritične elektrane (300 bara, 615/630 °C) imaju učinkovitost veću od 44 %. Povećanje učinkovitosti direktno je povezano sa smanjenjem troškova i emisija CO₂.



Slika 41. Stupanj iskoristivosti različitih generatora pare [8]

3.1.2. Parna turbina u Medupi elektrani

Parne turbine koje će se ugraditi i u termoelektranu Medupi i u Kusile su parne turbine proizvođača Alstom, tipa STF100. Svaka turbina sastoji se od visokotlačnog, srednjetačnog i niskotlačnog dijela kako je prikazano na slici 42.



Slika 42. Dijelovi parne turbine Alstom STF100 [6]

Viskotlačni dio je projektiran kao dvostruka ljuska s vanjskim i unutarnjim kućištem. Unutarnje kućište nosi stacionarne lopatice. Ravnina vanjskog kućišta je horizontalna i nalazi se na razini osi rotacije. Vanjsko kućište je spojeno pomoću hidraulički zategnutih vijaka, a unutarnje je uglavnom spajano pomoću zateznih prstena. Rotor je zavarenog tipa s integriranim spojka.

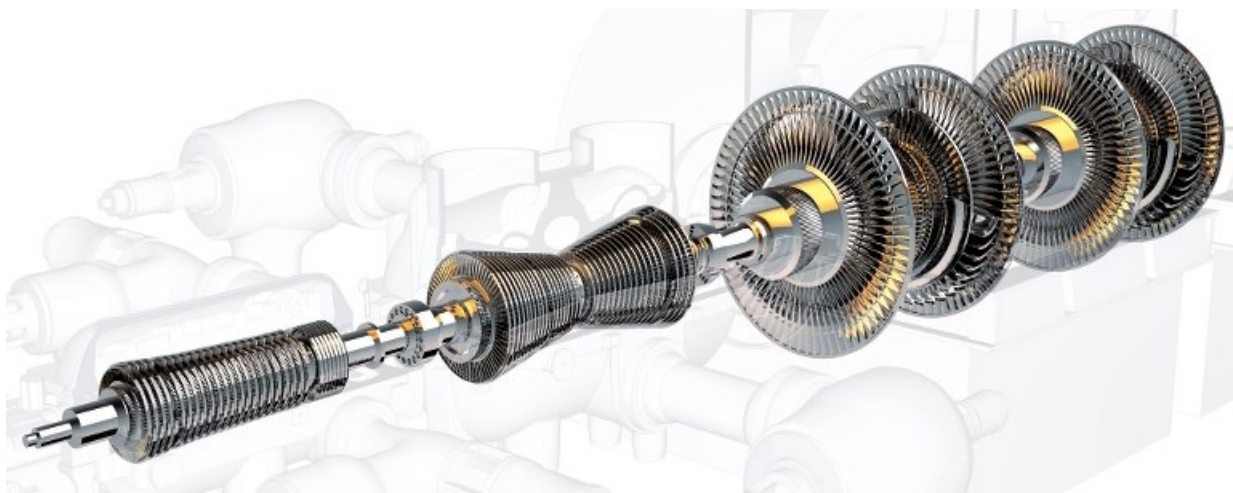
Nakon prolaska kroz zaustavne i kontrolne ventile, para struji kroz ventilski difuzor do ulaznih puževa unutarnjeg kućišta. Ovi puževi projektirani su tako da usmjere protok pare uzvodno do prvog reda lopatica. Prvi stacionarni radijalni red lopatica optimizira struju pare kako bi se postigla najučinkovitija ekspanzija. Nakon ekspanzije kroz aksijalne lopatice, para se ispušta kroz mlaznice koje se nalaze na dnu kućišta turbine. Ravnotežni klip ispred lopatica koristi se za kompenzaciju aksijalnog potiska uzrokovanog rotorskim lopicama.

Srednjetačni dio je također projektiran kao dvostruka ljuska s vanjskim i unutarnjim kućištem. Unutarnje kućište nosi stacionarne lopatice. Ravnina koja razdvaja unutarnje i vanjsko kućište

je horizontalna i nalazi se na razini osi rotacije. Rotor je zavarenog tipa s integriranim spojka, a oba kućišta su spojena pomoću hidraulički zategnutih vijaka. Para prolazi kroz glavne ventile i zatim se direktno usmjerava prema lopaticama. Cijevi srednjetačnog dijela povezuju ventile s unutarnjim kućištem. Nakon ekspanzije u aksijalnim lopaticama, para se ispušta kroz mlaznice koje se nalaze na gornjem dijelu vanjskog kućišta. Para za zagrijavanje napojne vode je odvaja na određenim mjestima niz dužinu lopatica. Odvojena para se skuplja u takozvane džepove koji su ugrađeni u unutarnjem kućištu, a zatim se prenosi do predgrijača napojne vode kroz mlaznice na dnu turbine.

Niskotlačni dio je također projektiran kao dvostruka ljuska. Zavareno vanjsko kućište sastoji se od razdvojenog gornjeg i donjeg dijela. Gornji dio se može skinuti radi inspekcije i održavanja bez rezanja veze s kondenzatorom. Gornji i donji dio kućišta su zašarafljeni na središnju ravninu na razini osi rotacije. Nakon što para prijeđe prijelazne cijevi, ulazi u niskotlačni dio turbine koji se sastoji od dva kućišta s konfiguracijom dvostrukog protoka. Na svakom niskotlačnom ulazu nalazi se ulazi puž koji jednakomjerno dijeli protok pare na dva niskotlačna protoka. Nakon ekspanzije para se ispušta horizontalno u zrakom hlađeni kondenzator.

3D prikaz STF100 turbine dan je na slici 43.



Slika 43. Parna turbina Alstom STF100, 800 MW [6]

3.1.3. Električni generator

Parna turbina je direktno povezana s generatorom proizvođača Alstom, tipa GIGATOP, dvopolni hlađen vodikom i vodom. Namotaj statora se hladi vodom, dok se rotor i jezgra hlade vodikom. Ovakav sustav hlađenja osigurava visoku razinu učinkovitosti i pri punom opterećenju i na djelomičnom opterećenju. Njegova konstrukcija dvostruke ploče omogućuje dostavljanje jalove snage u mrežu u slučaju poremećaja. Komponente generatora su rastavljive radi lakšeg održavanja. Aksijalno je fleksibilan kako bi omogućio termalnu ekspanziju, a istovremeno je krut u radijalnom i aksijalnom smjeru kako bi izdržao jake elektromagnetne sile. Trostruki brtveni sustav vodika koristi se umjesto dvostrukog kako bi se vodik održao na visokoj razini čistoće i kako bi se smanjila njegova potrošnja. To rezultira neprekidnom visokom učinkovitosti i manjim proizvodnim troškovima.



Slika 44. Električni generator u Medupiju



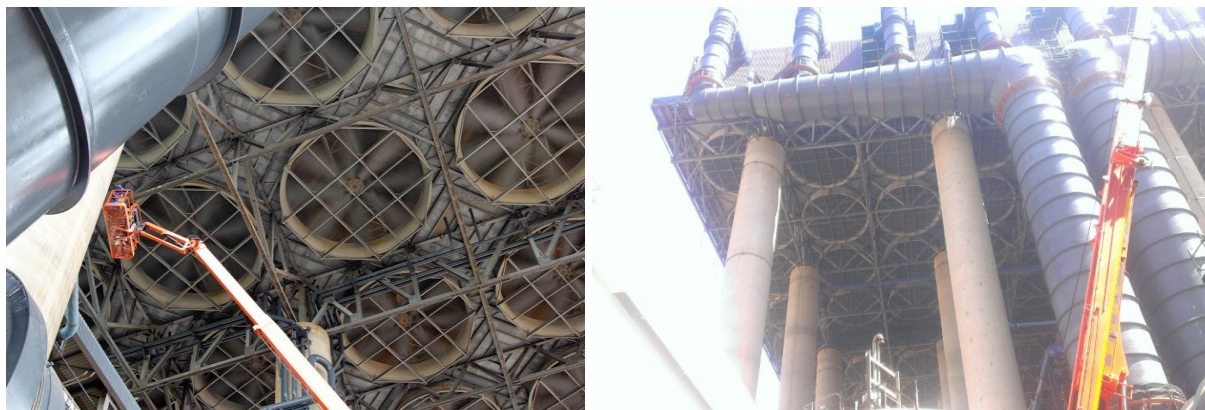
Slika 45. Dalekovod u izgradnji [6]

3.1.4. Kondenzator

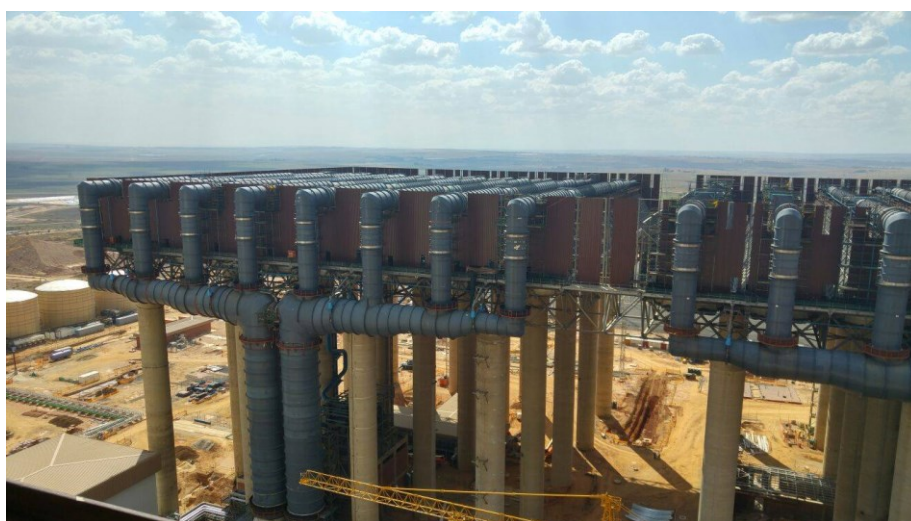
Zbog nedostatka vode u Južnoj Africi logičan odabir za kondenzator u elektranama Medupi i Kusile bio je zrakom hlađeni kondenzator (ACC- Air Cooled Condenser). Zrakom hlađeni kondenzator kondenzira ispušnu paru koja dolazi iz parne turbine i vraća kondenzat u generator pare. Kondenzatori u Medupiju i Kusileu će biti najveći zrakom hlađeni kondenzatori u Svijetu, svaki površine veće od 72000 m². Dosad je rekord držala termoelektrana Matimba također smještena u Južnoj Africi. Alstom je ugovor za izvođača kondenzatora sklopio s firmom GEA rashladni sistemi, sa sjedištem u Germistonu pokraj Johannesburga. GEA će također dostaviti cijelu čeličnu konstrukciju za kondenzator uključujući potpornu čeličnu konstrukciju, palubu ventilatora, prstene ventilatora, cjevovode za zrak i vodu i električnu kontrolu. Glavne komponente kondenzatora su zrakom hlađeni kondenzatorski moduli koji se sastoje od galvaniziranih zrakom hlađenih kondenzatorskih cijevi, sakupljača kondenzata i pare i sistema protoka zraka koji se sastoji od ventilatora, zupčanika, spojki, električnih motora, spremnika kondenzata, odvodnih pumpi, ejektora pare i sistema za pročišćavanje. U kombinaciji s okolišnom temperaturom, brzina i smjer vjetra će imati veliki utjecaj na učinak kondenzatora što će također imati utjecaj na turbinski povratni tlak i u konačnici na izlaznu snagu elektrane. GEA je stoga provela detaljnu dinamičku analizu dinamike fluida (CFD – Computational Fluid Dynamics) kako bi što bolje predvidjela raspodjelu strujanja zraka oko i unutar kondenzatora, kao i utjecaj distribucije zraka na učinkovitost kondenzatora. Detaljna analiza i opis zrakom hlađenih kondenzatora dana je u poglavlju 4. Na slikama ispod prikazan je zrakom hlađeni kondenzator u termoelektrani Medupi.



Slika 46. Nosiva konstrukcija kondenzatora



Slika 47. Ventilatori kondenzatora [7]



Slika 48. Pogled na kondenzator u izgradnji [7]



Slika 49. Prikaz izmjenjivačkih površina kondenzatora

Konstrukcija kondenzatora je oblika A - okvira što znači da se ventilator postavlja ispod dvije izmjenjivačke površine u oblik jednakostraničnog trokuta. Ventilator je promjera 11 metara, a izmjenjivačke površine sadrže snop cijevi vanjskog promjera 60 mm, debljine 5 mm. U cijev većeg promjera koja se nalazi na vrhu konstrukcije dolazi ispušna para iz niskotlačnog dijela turbine brzinom 78 m/s i preko razdjeljivača se raspodjeljuje u manje cijevi koje se nalaze na izmjenjivačkim površinama. Tijekom kondenzacije, kondenzat se slijeva i skuplja u dnu konstrukcije i nastavlja put prema pumpi.

Spoj ispušnog dijela turbine i kondenzatora prikazan je na slici 50.



Slika 50. Spoj niskotlačnog dijela turbine i kondenzatora [6]

Betonski stupovi nose konstrukcije kondenzatora su visoki 54 metra i nose ukupno 64 ventilatora. Ukupna površina kondenzatora za svih šest jedinica elektrane biti će 72 252 m² što ga čini najvećim zrakom hlađenim kondenzatorom u svijetu. Detaljan opis ovakvih kondenzatora dan je u poglavlju 4.

3.2. Utjecaj na okoliš i društvo

Zemljište na kojem se gradi elektrana Medupi je nekoć bilo poljoprivredno zemljište na kojem se uzgajao kikiriki i koje je služilo za ispašu stoke. Nakon dogovora o izgradnji elektrane, tvrtka Exxaro Coal Ltd. otkupila je zemlju i 2007. godine počela je gradnja. Prije izgradnja napravljena je temeljita analiza utjecaja na okoliš i poduzete su mjere zaštite već tijekom pripreme zemljišta za početak gradnje, kao npr. presađivanje stabala i premještanje životinja na druga staništa. Također, napravljen je program za hvatanje i selidbu svih zmija, gmazova i ostalih životinja na samoj lokaciji. Do sada su premještene 1293 životinje. Medupi teži najvišim mogućim standardima ekološke izvedbe sustava upravljanja, certificiranog prema normi ISO 14001, a samu elektranu konstantno nadgleda i ispituje niz nezavisnih vanjskih i unutarnjih inspekcija i revizija što pruža objektivan pregled trenutnog stanja i daje mogućnosti poboljšanja.

Što se tiče emisija stakleničkih plinova, Medupi, osim što je prva nadkritična elektrana građena od Eskoma, također je jedna od prvih elektrana koja će imati moderne tehnologije čistog ugljena poput odsumporavanja dimnih plinova što će smanjiti emisiju SO_x za 90 %, zatim mlazne filtre kojima će se ukloniti oko 99 % čestica, te redukciju dušikovih oksida pomoću posebno konstruiranih plamenika. Sve ove mjere smanjiti će utjecaj na okoliš odnosno utjecaj na kvalitetu zraka, a istovremeno će smanjiti potrebnu količinu ugljena za izgaranje po MWh. Kako bi se utjecaj na okoliš što bolje kontrolirao, osnovan je nezavisni odbor za praćenje stanja okoliša koji kontinuirano nadgleda usklađenost izvođenja projekta i uvjeta provedbe zaštite okoliša. Odbor se sastoji od nezavisnog predsjednika, članova lokalne zajednice, Eskoma, službenika za kontrolu okoliša i ekologa.

Projekt izgradnje elektrane Medupi kao i elektrane Kusile, uvelike će pomoći gospodarskom razvoju lokalne zajednice. Od početka gradnje do danas, izgrađeno je 995, a kupljena je 321 kuća u području Lephalalea. U takozvanom radničkom kampu moguće je smjestiti 6715 radnika. Također su izgrađene brojne ceste za prijevoz materijala, strojeva, ljudi i sirovina. Znatna količina novca uložena je u izgradnju elektroenergetske infrastrukture, otvorene su klinike s modernom medicinskom opremom, škole za djecu, ali i škole za osposobljavanje radnika koje će nezaposlenom stanovništvu pružiti mogućnost rada i nakon završetka gradnje elektrana.

Još neke zanimljivosti vezane za izgradnju elektrana:

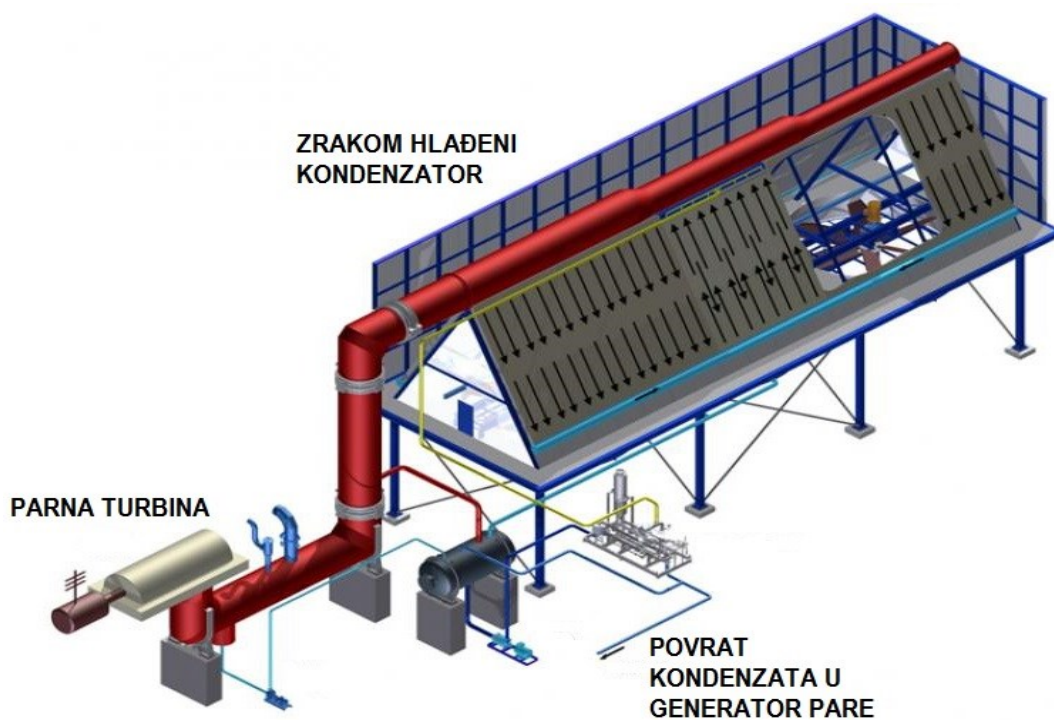
- Za izgradnju elektrane Medupi iskoristit će se 120 000 tona konstrukcijskog čelika potrebnog za izgradnju šest kotlova, što je više čelika nego što je bilo potrebno za izgradnju najviše zgrade u svijetu Burj Khalifa u Dubaiu
- Visina generatora pare je oko 130 metara
- Očekuje se otvaranje 17 000 radnih mjesta tijekom izgradnje
- BDP u gradu Lephalale povećao se za oko 95 % kao rezultat građevinskih i poratnih aktivnosti
- BDP Južnoafričke republike rasti će oko 0,35 % godišnje zahvaljujući novim elektranama
- Dnevno se za potrebe radnika na gradilištu posluži oko 22 340 porcija hrane
- Najviša točka elektrane je dimnjak od 220 m
- Poboljšana je zaštita okoliša zahvaljujući zrakom hlađenim kondenzatorima, filterima, redukciji NO₂ te nadkritičnim generatorima pare
- Za izgradnju generatora pare koristi se 140 m visoka dizalica kapaciteta 800 tona



Slika 51. Dizalica za izgradnju generatora pare visine 140 m

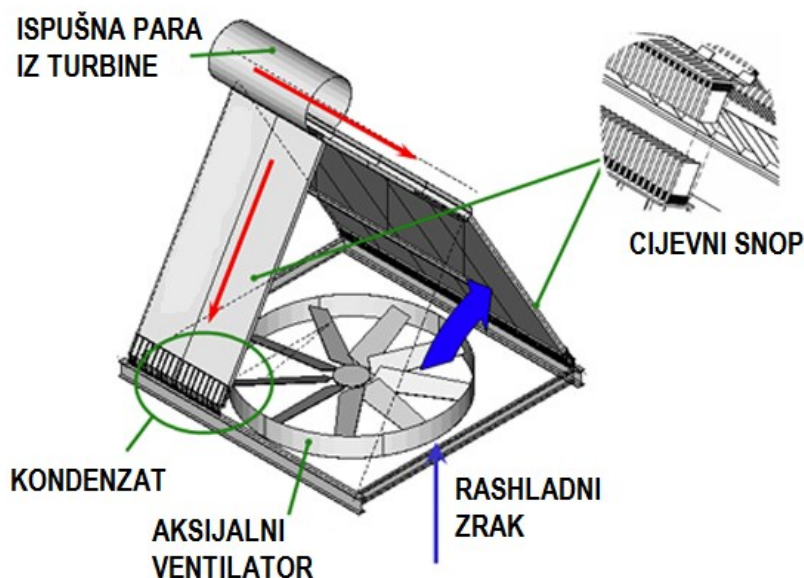
4. ZRAKOM HLAĐENI KONDENZATORI

Veliki zrakom hlađeni kondenzatori koriste se u proizvodnji električne energije za kondenzaciju pare u zatvorenom parnom ciklusu. Spoj takvog kondenzatora i parne turbine prikazan je na slici 52 i najčešće se izvodi kao direktan spoj što znači da nema posrednog rashladnog medija već se para kondenzira preko izmjenjivača topline sa zrakom kao rashladnim medijem.



Slika 52. Prikaz zrakom hlađenog kondenzatora [18]

Zrak se dobavlja prisilnom ventilacijom pomoću ventilatora smještenih ispod rebrastih cijevi, dok su cijevi najčešće postavljene u A – okvir kao što je prikazano na slici 53. Jedan od najvećih postojećih kondenzatora ovog tipa nalazi se u Južnoj Africi u termoelektrani Matimba i sastoji se od šest kondenzatorskih jedinica koje se sastoje od 48 ventilatora promjera 9,145 m, svaki snage 270 kW. Svaki ventilator dobavlja oko 683,4 kg/s vanjskog zraka što je ukupno 32 803,2 kg/s za cijelu jedinicu od 48 ventilatora. [16] Ovi podaci pokazuju koliko snažni mogu biti zrakom hlađeni kondenzatori i koliko korisni mogu biti u područjima gdje je voda kao izvor hlađenja nedostupna.



Slika 53. Dijelovi zrakom hlađenog kondenzatora oblika A – okvira [19]

Zrakom hlađeni kondenzatori koriste zrak kao rashladno sredstvo što ih čini osjetljivima na vanjske uvjete kao što su brzina vjetra, visoka okolišna temperatura i ostale fluktuacije. Ukoliko brzina vjetra naglo poraste ili se okolišna temperatura poveća, kapacitet kondenzatora je smanjen zbog nedostatka rashladnog zraka i smanjenja temperaturne razlike između ispušne pare i vanjskog zraka. Tlak i temperatura ispušne pare koja izlazi iz turbine su direktna funkcija količine pare koja kondenzira u kondenzatoru. Proces kondenzacije smanjuje volumen pare u obliku kondenzata i stvara negativni tlak odnosno vakuum na izlazu iz turbine. Tlak pare koji je moguće ostvariti na izlazu iz turbine znatno utječe na korisnost procesa. Čak i malo smanjenje tlaka pare može uvelike koristiti sveukupnom procesu.

Iako je zrak mnogo dostupniji od vode i besplatan, procesno hlađenje u postrojenjima se najčešće izvodi s rashladnom vodom. Razlog tomu su manji troškovi hlađenja s vodom zahvaljujući znatno većem koeficijentu prijelaza topline na strani vode i nižoj temperaturi. Međutim, s povećanjem nestašica vode u nekim područjima i posljedičnim povećanjem cijena vode, sve se više koriste zrakom hlađeni kondenzatori. Investicijski troškovi za zrakom hlađeni kondenzator su mnogo veći nego za vodom hlađeni kondenzator, ali operativni troškovi su obično mnogo manji. Operativni troškovi vodenog hlađenja obuhvaćaju troškove prvo vode, dodatne vode, kemikalija za tretiranje vode, troškove tornja za hlađenje i cijenu pumpi. Za hlađenje zrakom, operativni trošak je samo trošak snage potrebne da bi se protok zraka usmjerio preko snopova cijevi. Stoga, gledajući ukupno, zrakom hlađeni kondenzatori su prilično isplativiji od vodenih.

Konstrukcija zračnog hlađenja obuhvaća dva različita polja : termodinamički proračun i mehanički proračun. U termodinamički proračun spada proračun potrebne površine izmjenjivača topline, dok se mehanički proračun odnosi na proračun debljine i dimenzija različitih komponenti konstrukcije kao i materijala koji će se koristiti u izgradnji.

4.1. Prednosti zrakom hlađenih kondenzatora

Hlađenje zrakom ima mnoge prednosti pred hlađenjem vodom. Već su spomenuti niži operativni troškovi , a osim toga zrakom hlađeni kondenzatori eliminiraju mnoge probleme vodenog hlađenja :

- Lokacija kondenzatora, a s time i cijele elektrane je neovisna o izvoru vode pa se elektrana može nalaziti u bilo kojem geografskom području. Kod korištenja vode kao rashladnog medija, elektrana ili neka druga tvornica, mora se nalaziti blizu velikog izvora vode (rijeka, jezero, more) što može biti problem za transport materijala ili gotovog proizvoda.
- Gledajući s ekološkog aspekta, hlađenje zrakom je daleko povoljnije za okoliš jer je eliminirano termičko i kemijsko onečišćenje vode. Kod jednoprolaznog vodenog hlađenja, topla voda iz kondenzatora se vraća u izvor vode što nakon nekog vremena uzrokuje povećanje temperature vode što ima direktan utjecaj na život biljnih i životinjskih vrsta koje nastanjuju određeni izvor vode. Kod recirkulirajućeg vodenog hlađenja koje je danas standard, izlazna voda se hladi u vodenom tornju kako bi se eliminirao loš utjecaj ispuštanja tople vode u okoliš.
- Troškovi održavanja su značajno sniženi pošto nema čestog čišćenja vodene strane izmjenjivača koje je potrebno radi sprječavanja kamenca, sedimentacije itd.
- Instalacija je jednostavnija pošto nema cijevi i pumpi za vodu. Još jedna velika prednost zračnog hlađenja je da nastavljaju raditi pomoću prirodne konvekcije ukoliko dođe do nestanka struje, za što je zaslužan sam dizajn izmjenjivača. U slučaju hlađenja vodom, nestanak struje znači isključivanje elektrane što rezultira velikim gubicima u proizvodnji.
- Zrakom hlađeni izmjenjivači nude vrlo učinkovitu i preciznu kontrolu izlazne temperature radnog fluida pomoću slijedećih komponenti : sklopke za isključivanje / uključivanje ventilatora, dvobrzinskih motora, ventilatora s promjenjivom brzinom okretanja, korištenjem rešetki i promjenjive brzine pogona. S druge strane, hlađenje vodom nije učinkovito za kontrolu izlazne temperature radnog fluida.

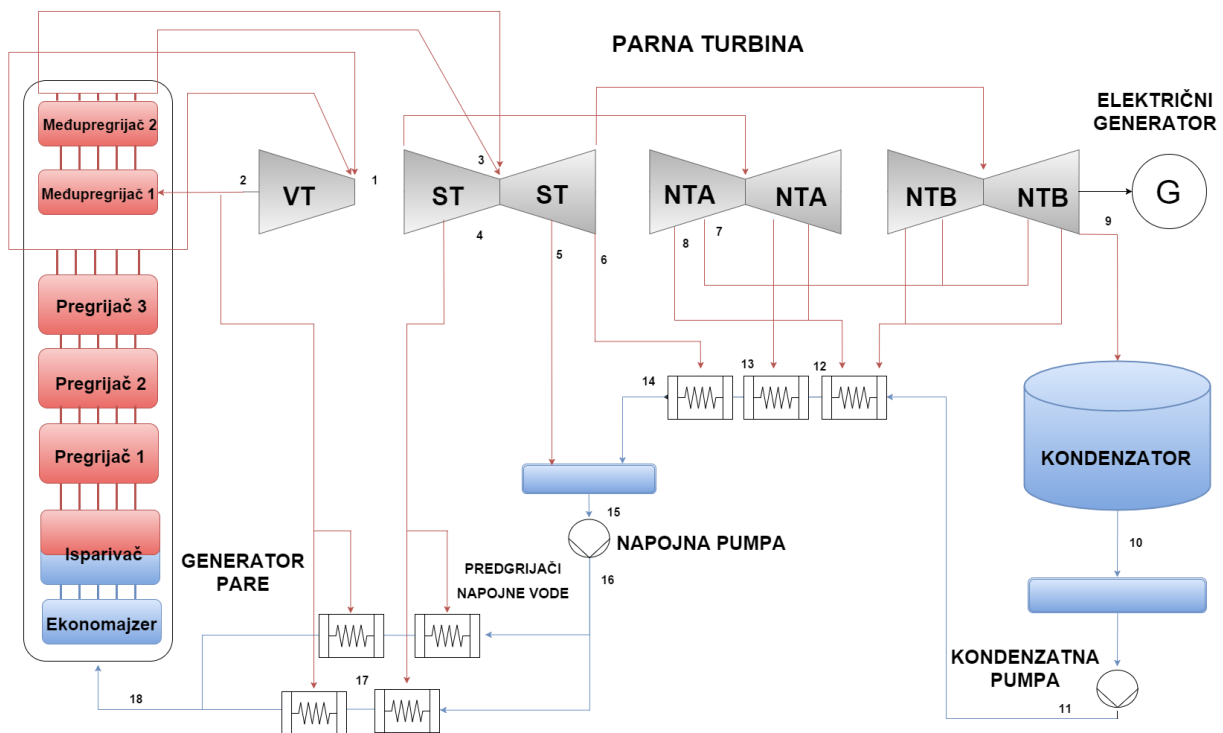
4.2. Nedostaci zrakom hlađenih kondenzatora

Ograničenja zrakom hlađenih kondenzatora u odnosu na vodom hlađene kondenzatore su:

- Visoki investicijski troškovi – budući da zrak ima mnogo manji koeficijent prijelaza topline i specifičnu toplotu od vode, zrakom hlađeni izmjenjivači topline imaju znatno niži ukupni koeficijent prolaza topline i posljedično mnogo veće cijevi tj. površinu izmjene topline od vodom hlađenih izmjenjivača topline te je stoga i investicija znatno veća kod zrakom hlađenih izmjenjivača. Međutim, ako proces hlađenja vodom zahtijeva cijevi od mjeda, bakar – nikal cijevi ili nehrđajućeg čelika, investicijski nedostatak zrakom hlađenih izmjenjivača topline se znatno smanjuje.
- U hladnijim klimama potrebna je skupa oprema za zaštitu sustava od niskih temperatura što dodatno povećava investiciju. Zaštita zrakom hlađenog kondenzatora znači omogućavanje njegovog rada čak i na zimskim uvjetima tj. onemogućavanje smrzavanja struje radnog fluida. Ovakva zaštita uključuje ugradnju dodatnih otvora za kontrolu protoka zraka, okretanje smjera protoka zraka pa čak i recirkulacijske sustave.
- Zrakom hlađeni kondenzatori zahtijevaju oko tri puta veću površinu u odnosu na vodom hlađene kondenzatore.
- Veća površina potrebnog zemljišta – veća potrebna površina za izmjenu topline zahtijeva i veću površinu zemljišta za zrakom hlađeni nego za vodom hlađeni kondenzator. Ovaj nedostatak riješen je postavljanjem izmjenjivača na cijevni nosač tako da se što manje površine izgubi. Procesna oprema poput akumulatora, pumpi i „shell and tube“ izmjenjivača tj. izmjenjivača s cijevima u plaštu, obično se nalazi ispod cijevnog nosača.
- Buka ventilatora – zbog niske specifične topline i gustoće zraka, zrakom hlađeni izmjenjivači moraju dovesti velike količine zraka preko snopova cijevi, što rezultira visokom razinom buke. Međutim, razvili su se ventilatori koji reduciraju razinu buke na prihvatljive razine te je ovaj problem znatno smanjen.
- Ograničenja u lokaciji elektrane – zrakom hlađeni kondenzatori ne mogu se izgraditi pokraj velikih građevinskih prepreka poput zgrada jer može doći do poremećaja u predviđenoj cirkulaciji zraka što dovodi do znatnih promjena u radu kondenzatora i njegovoj iskoristivosti. Međutim, ovaj problem ne bi trebao predstavljati veliku prepreku jer promišljen izgled, raspored i lokacija postrojenja u potpunosti zaobilazi ovakav problem.

5. MATEMATIČKI MODEL

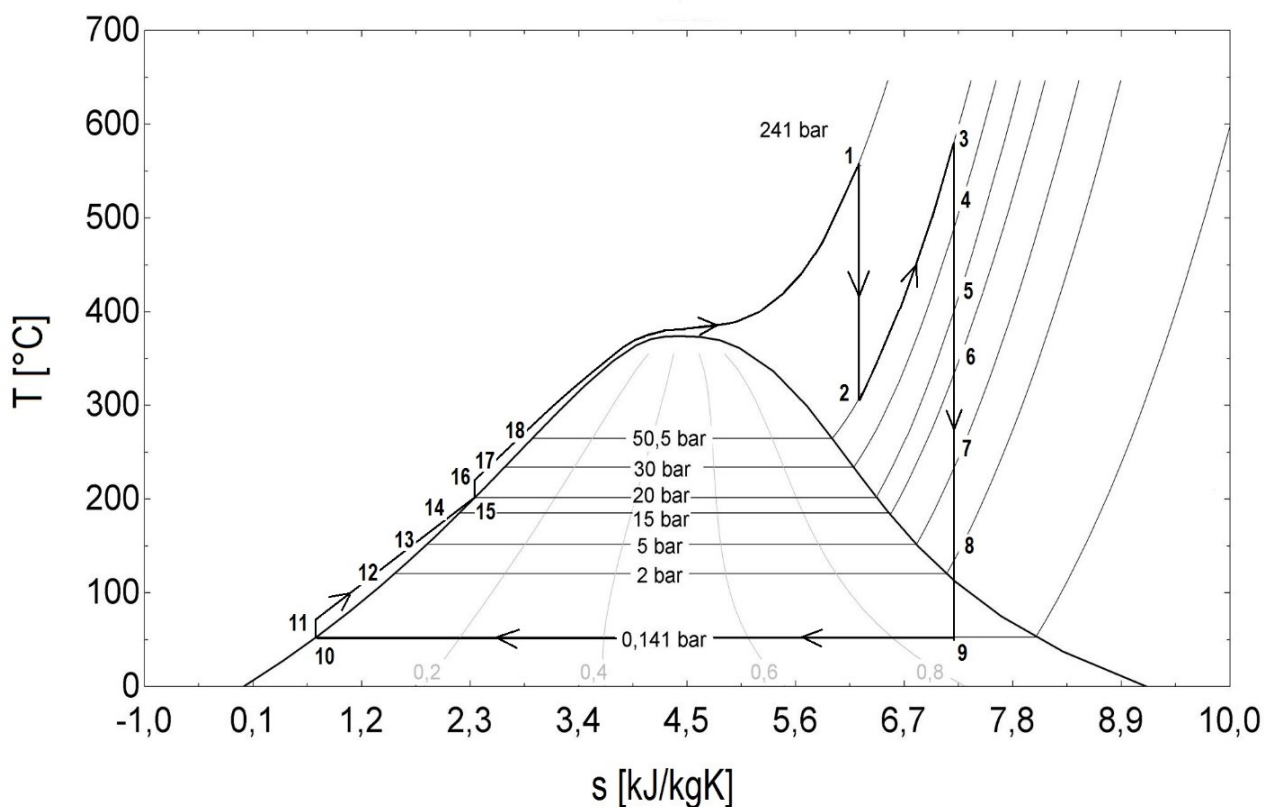
Termodinamički proračun kružnog ciklusa termoelektrane Medupi napravljen je u programskom paketu Visual Basic te je ispitan utjecaj vanjske temperature zraka i površine kondenzatora na stupanj iskoristivosti elektrane. Radi boljeg razumijevanja samog procesa, na slici 54. prikazan je dijagram na kojem su označene glavne točke čije su vrijednosti proračunate.



Slika 54. Procesni dijagram kružnog ciklusa

U točki 1, para pregrijava na $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ s tlakom od 241 bar, ulazi u visokotlačni dio turbine gdje ekspandira do stanja 2 odnosno do tlaka od 50,5 bara s kojim ulazi u međupregrijač. Prije nego para uđe u međupregrijač, dio pare se oduzima za zagrijavanje pregrijača napojne vode. U međupregrijaču para se ponovno pregrijava do temperature $570\text{ }^{\circ}\text{C}$ i s tim stanjem (točka 3) ulazi u srednjetačni dio turbine. U srednjetačnom dijelu turbine postoje tri oduzimanja pare koja se koriste za predgrijavanje napojne vode, otplinjača i kondenzata. Nakon što para ekspandira u srednjetačnom dijelu, ulazi sa stanjem 6 u niskotlačni dio turbine koji se sastoji od dva jednaka dijela u koje ulazi jednaka količina pare. Niskotlačni dio turbine je najveći zbog većeg volumena ekspandirane pare te kako bi se što više energije dobilo. Oduzimanja u niskotlačnom dijelu koriste se za zagrijavanje kondenzata. Kada je para potpuno ekspandirala (točka 9), šalje se u zrakom hlađeni kondenzator u kojem kondenzira do kapljevine odnosno

stanja 10. Potom se ta kapljevina u kondenzatnoj pumpi tlači do određenog tlaka u otplinjaču i šalje u zagrijače kondenzata i otplinjač. U otplinjaču se voda zagrijava tijekom miješanja s parom iz oduzimanja prilikom čega se smanjuje topivost kisika te se on otplinjava. Toplinsko otplinjavanje je jedan od važnijih postupaka toplinske obrade napojne vode tijekom kojeg se iz vode uklanjaju kisik i ugljikov dioksid koji imaju korozivno djelovanje. Iz otplinjača voda se šalje u napojnu pumpu u kojoj se tlači na tlak generatora pare odnosno 241 bar što je nadkritično stanje u kojem voda egzistira kao parna faza te s takvim stanjem prolazi kroz sustav predgrijača u kojem se grije parom iz turbinskih oduzimanja. Sa stanjem 18 nadkritična para ulazi u generator pare gdje se kroz sustav izmjenjivača topline tj. pregrijača pare dovodi u stanje 1 s kojim ulazi u visokotlačni dio turbine gdje opet počinje kružni ciklus. Proces je prikazan u T,s – dijagramu (temperatura – entropija) na slici 55.



Slika 55. T,s - dijagram idealnog procesa u Medupi elektrani

Da bi se provelo proračun procesa s obzirom na određene parametre, bilo je potrebno proračunati toplinska stanja naznačenih točki procesa. Glavne veličine koje su dobivene pomoću funkcija u visual basicu su temperatura, tlak, entalpija i entropija. Vrijednosti masenih protoka pojedinih oduzimanja su pretpostavljene te kasnije izračunate. Također je proračunata

snaga dobivena tijekom svakog dijela ekspanzije pare pomoću koje se dobila i ukupna iskoristivost postrojenja.

Ulazne vrijednosti pomoću kojih su dobivene vrijednosti termodinamičkih parametara u svakoj točki procesa prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Ulazni podaci za matematički model

Redni broj	Ulazni podaci	Simbol	Vrijednosti	Jedinice
1	Električna snaga	Pe	794,8	MW
2	Temp.svježe pare	T(1)	560	°C
3	Tlak svježe pare	P(1)	241	bar
4	Tlak oduzimanja 1	P(2)	50,5	bar
5	Tlak pare nakon međupr.	P(3)	50,5	bar
6	Tlak oduzimanja 2	P(4)	30	bar
7	Tlak oduzimanja 3	P(5)	20	bar
8	Tlak oduzimanja 4	P(6)	15	bar
9	Tlak oduzimanja 5	P(7)	5	bar
10	Tlak oduzimanja 6	P(8)	2	bar
11	Tlak kondezatora	P(9)	0,141	bar
12	Iskoristivost 1.stupnja	Eta1	95	%
13	Iskoristivost 2.stupnja	Eta2	95	%
14	Iskoristivost 3.stupnja	Eta3	90	%
15	Iskoristivost 4.stupnja	Eta4	90	%
16	Iskoristivost 5.stupnja	Eta5	90	%
17	Iskoristivost 6.stupnja	Eta6	95	%
18	Iskoristivost 7.stupnja	Eta7	95	%
19	Mehanički eta	Eta_m	98	%
20	Električni eta	Eta_e	96	%
21	Eta generatora pare	Eta_gp	98	%
22	Eta pumpi	Eta_pumpe	82	%

Cijeli kod matematičkog modela dan je u prilogu 1.

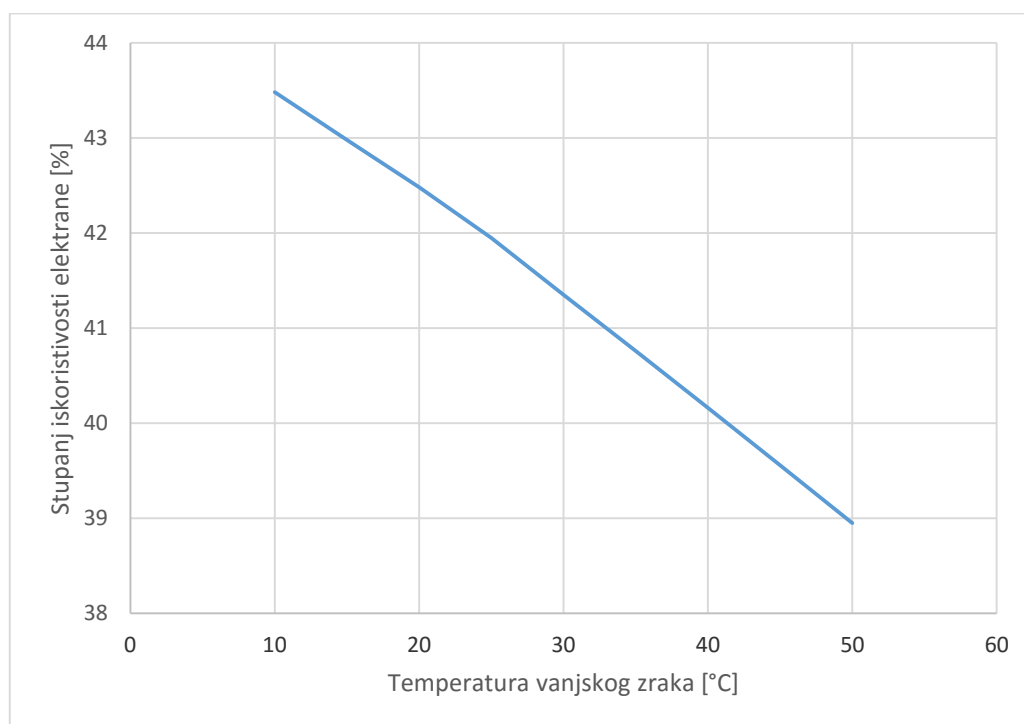
Drugi dio proračuna bio je proračun zrakom hlađenog kondenzatora koji se sastojao od proračuna koeficijenta prijelaza topline na strani pare i na strani zraka o kojima ovisi iznos topline kondenzacije. Geometrija kondenzatora je poznata i predstavlja nepromjenjivi ulazni parametar što znači da je broj cijevi u kondenzatoru određen iznosom potrebne količine topline kondenzacije odnosno topline koju je potrebno odvesti okolišnim zrakom da bi para kondenzirala. Proračun kondenzatora rezultira takvom temperaturom kondenzacije pri kojoj će se u kondenzatoru upravo predati toliko topline koliko je potrebno da bi para iz turbine poprimila stanje vrele kapljevine.

Nakon što su proračunate potrebne vrijednosti, ispitala se ovisnost stupnja iskoristivosti elektrane o vanjskoj temperaturi i površini kondenzatora. Postupak proračuna kondenzatora prikazan je u prilogu 1 (modul 2) pomoću koda u visual basicu.

U tablici 3 prikazane su vrijednosti traženih parametara za različite temperature okolišnog zraka te je na slici 56 dijagramom prikazana promjena stupnja iskoristivosti.

Tablica 3. Vrijednosti stupnja iskoristivosti, temperature i tlaka kondenzacije i izlazne snage s obzirom na vanjsku temperaturu zraka

$T_{\text{zraka}} [^{\circ}\text{C}]$	Etta [%]	$p_{\text{kond}} [\text{bar}]$	$T_{\text{kond}} [^{\circ}\text{C}]$	$P_{\text{netto}} [\text{MW}]$
10	43,48	0,058	35,74	773,21
15	42,98	0,0798	41,49	773,08
20	42,48	0,1099	47,25	773,23
25	41,95	0,1506	53,06	772,84
30	41,35	0,192	58,95	771,67
35	40,76	0,2526	64,84	770,84
40	40,16	0,3244	70,77	770,15
45	39,56	0,4154	76,73	769,7
50	38,95	0,5296	82,71	769,5



Slika 56. Ovisnost stupnja iskoristivosti o vanjskoj temperaturi zraka

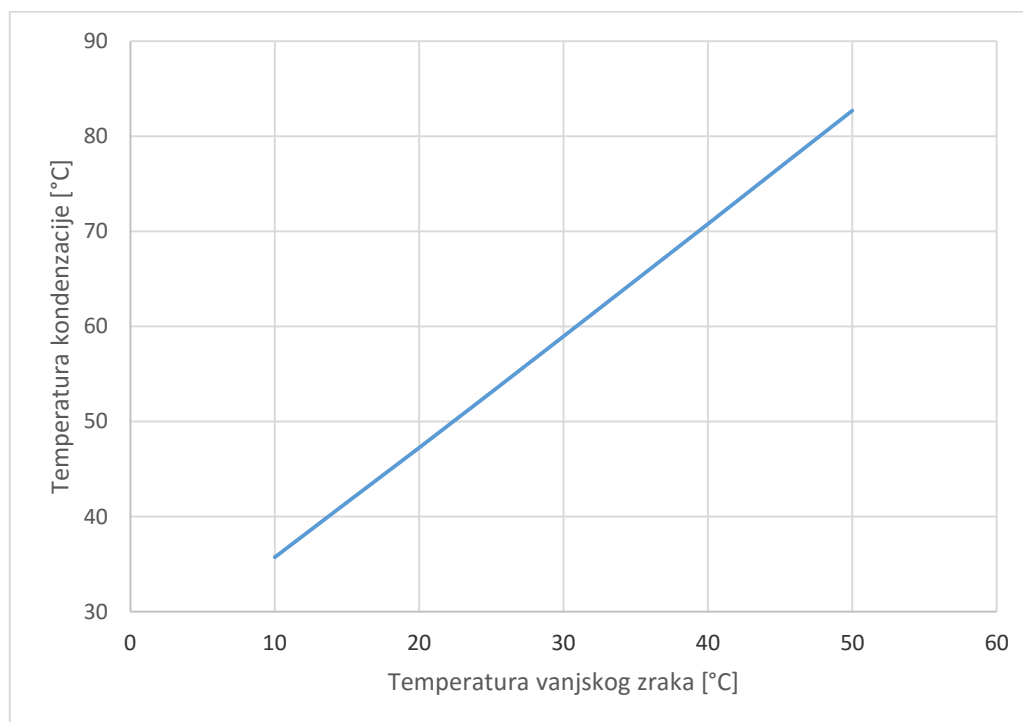
Stupanj iskoristivosti elektrane očigledno znatno ovisi o vanjskoj temperaturi zraka za hlađenje. Iz dijagrama se vidi da je stupanj iskoristivosti pao s vrijednosti 43,48 % na 38,95 % za

povećanje temperature okolnog zraka od 10 °C do 50 °C. Iskoristivost na temperaturi 40 °C je 40,16 % što odgovara službenim podacima koji govore da će energetska iskoristivost elektrane Medupi na vanjskoj temperaturi 40 °C i brzini vjetra od 9 m/s biti 40 %. Vanjska temperatura zraka utječe na srednju logaritamsku temperaturu koja se računa prema formuli (12).

$$dtm = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (12)$$

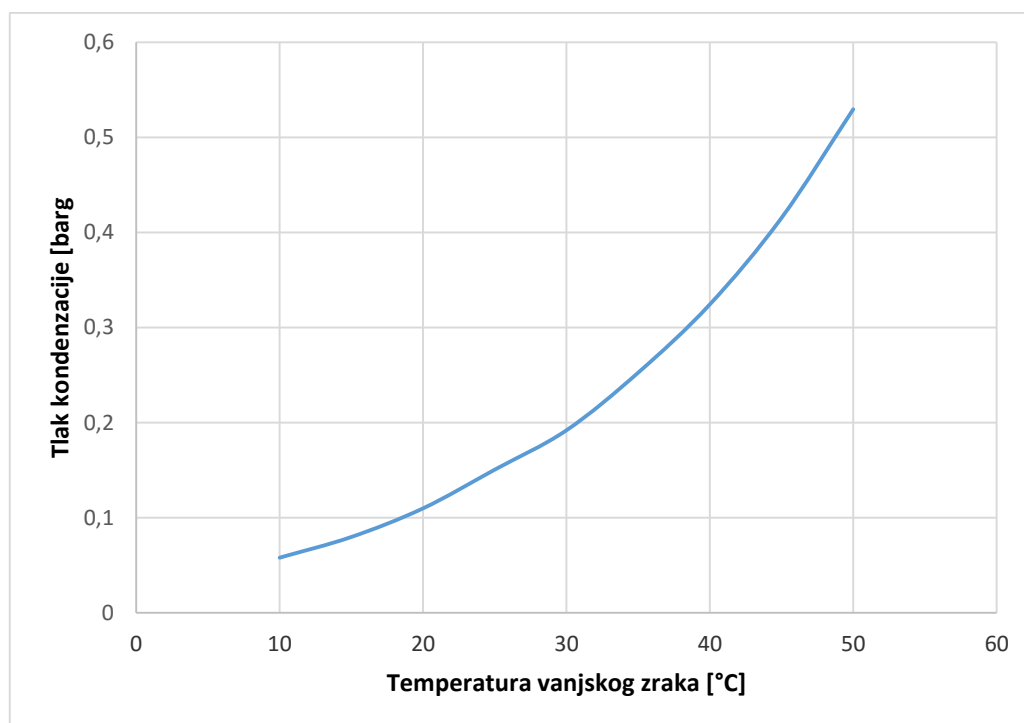
Gdje Δt_1 predstavlja razliku temperature kondenzacije i ulazne temperature zraka, a Δt_2 razliku temperature kondenzacije i izlazne temperature zraka.

Promjena temperature kondenzacije s porastom temperature vanjskog zraka prikazana je na slici 57, a promjena tlaka na slici 58.



Slika 57. Ovisnost temperature kondenzacije o vanjskoj temperaturi zraka

Iz dijagrama na slici 57 vidi se kako s porastom okolišne temperature zraka raste i potrebna temperatura kondenzacije s 35,74 °C na čak 82,71 °C.



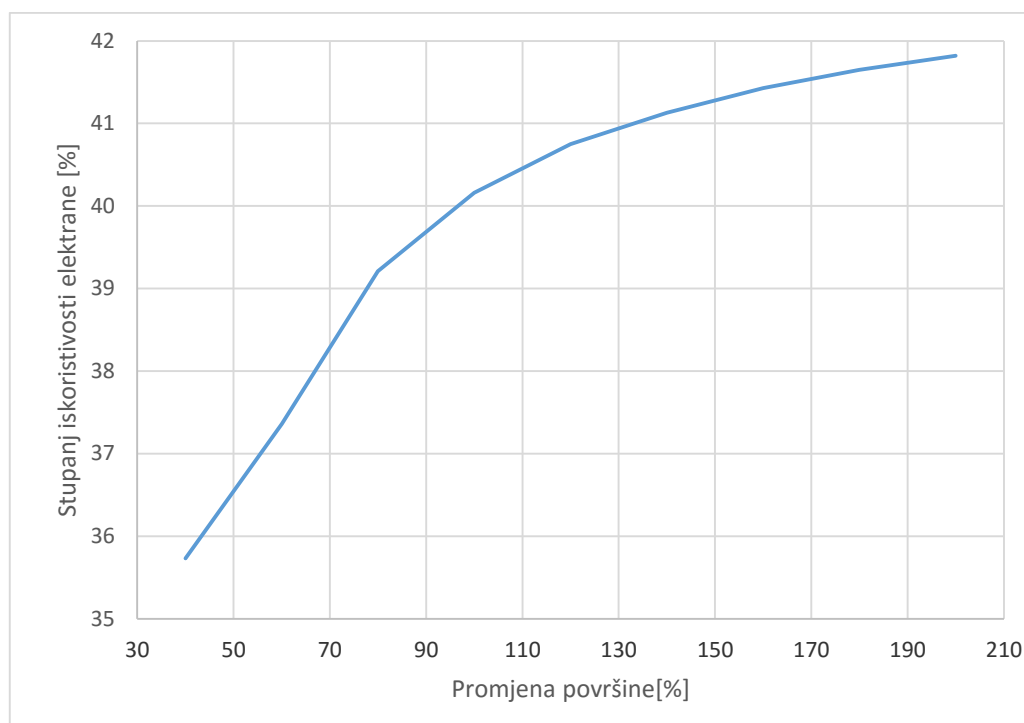
Slika 58. Ovisnost tlaka kondenzacije o temperaturi vanjskog zraka

Tlak kondenzacije također raste s porastom temperature vanjskog zraka.

U tablici 4 prikazane su vrijednosti traženih parametara za različite površine kondenzatora te je na slikama 59, 60, 61 dijagramima prikazana promjena stupnja iskoristivosti, temperature i tlaka kondenzacije. Proračun je proveden za vanjsku temperaturu od 40 °C.

Tablica 4. Vrijednosti stupnja iskoristivosti, temperature i tlaka kondenzacije i izlazne snage s obzirom na površinu kondenzatora

A [%]	Etta [%]	p_{kond} [bar]	T_{kond} [°C]	P_{netto} [MW]
40	35,73	1,64	134,84	767,55
60	37,36	0,97	98,72	770,23
80	39,21	0,48	80,24	769,56
100	40,16	0,3244	70,77	770,15
120	40,75	0,25	64,97	770,82
140	41,13	0,21	61,05	771,32
160	41,43	0,19	58,21	771,82
180	41,65	0,1716	56,05	772,25
200	41,82	0,1598	54,36	772,58

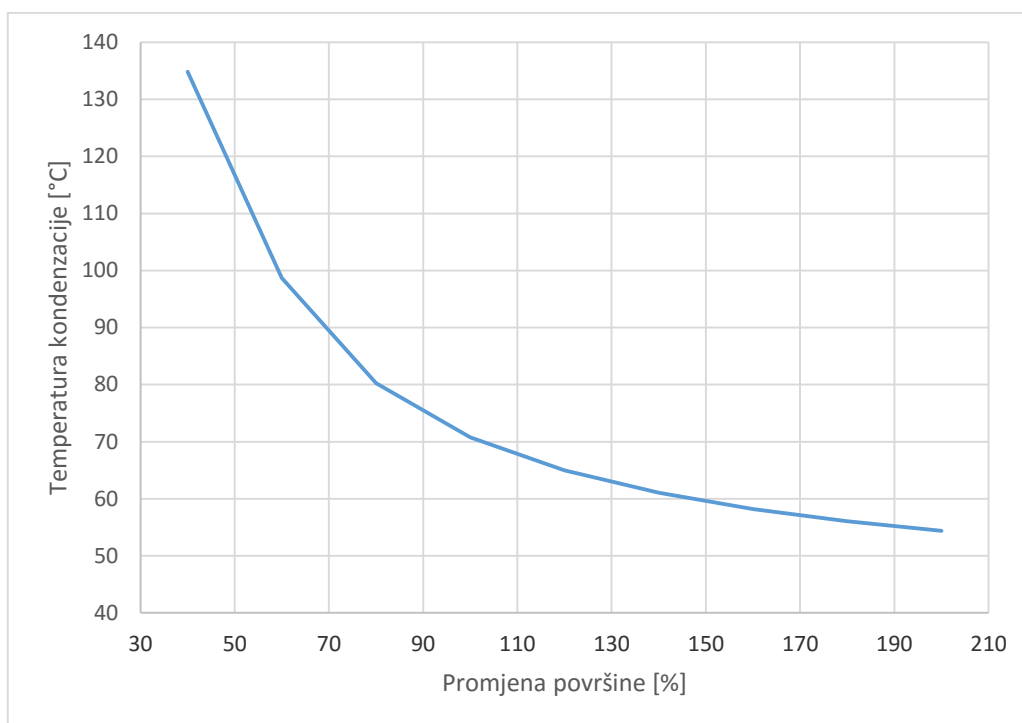


Slika 59. Ovisnost stupnja iskoristivosti elektrane o površini kondenzatora

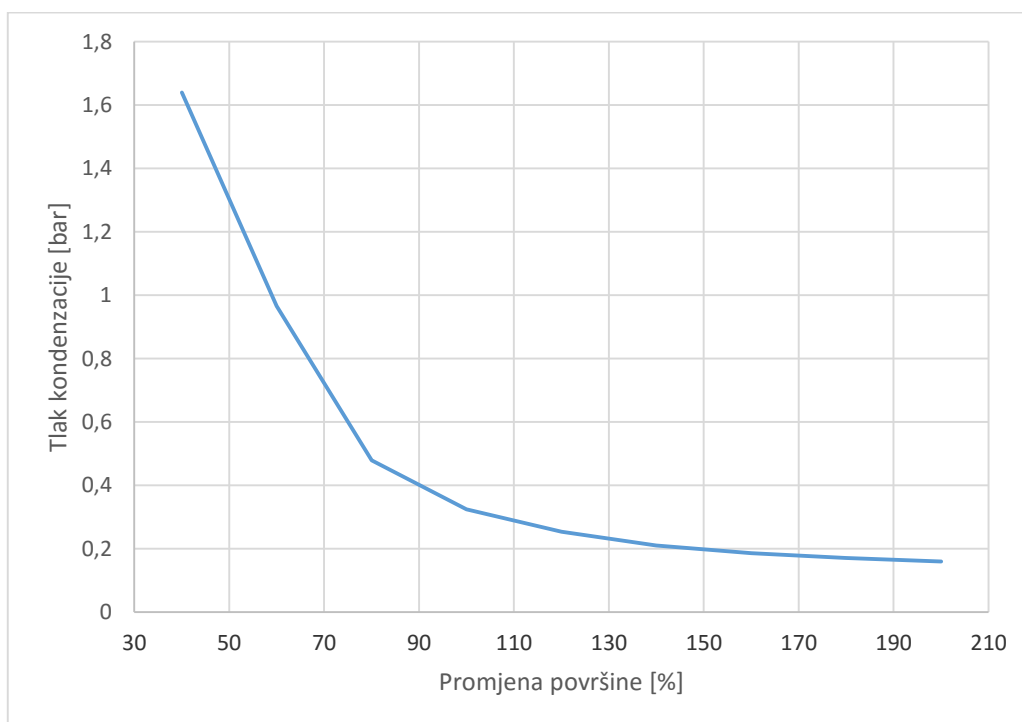
S porastom površine kondenzacije, raste i stupanj iskoristivosti elektrane od 40 % na oko 42 %. Površina kondenzacije ima veliki utjecaj na iskoristivost jer preko formule 13 direktno smanjuje ili povećava toplinu kondenzacije, a time i stupanj iskoristivosti cijelog postrojenja.

$$Q_{kond} = A \cdot k \cdot dtm \quad (13)$$

Temperatura kondenzacije pada s porastom površine kondenzatora jer prema formuli 13, ako povećamo površinu, a potrebna toplina kondenzacije ostane ista, manja je potrebna srednja logaritamska temperatura odnosno dolazi do smanjenja temperature kondenzacije. Proporcionalno temperaturi kondenzacije, smanjuje se i tlak kondenzacije kao što se vidi na slici 61.



Slika 60. Ovisnost temperature kondenzacije o površini kondenzatora



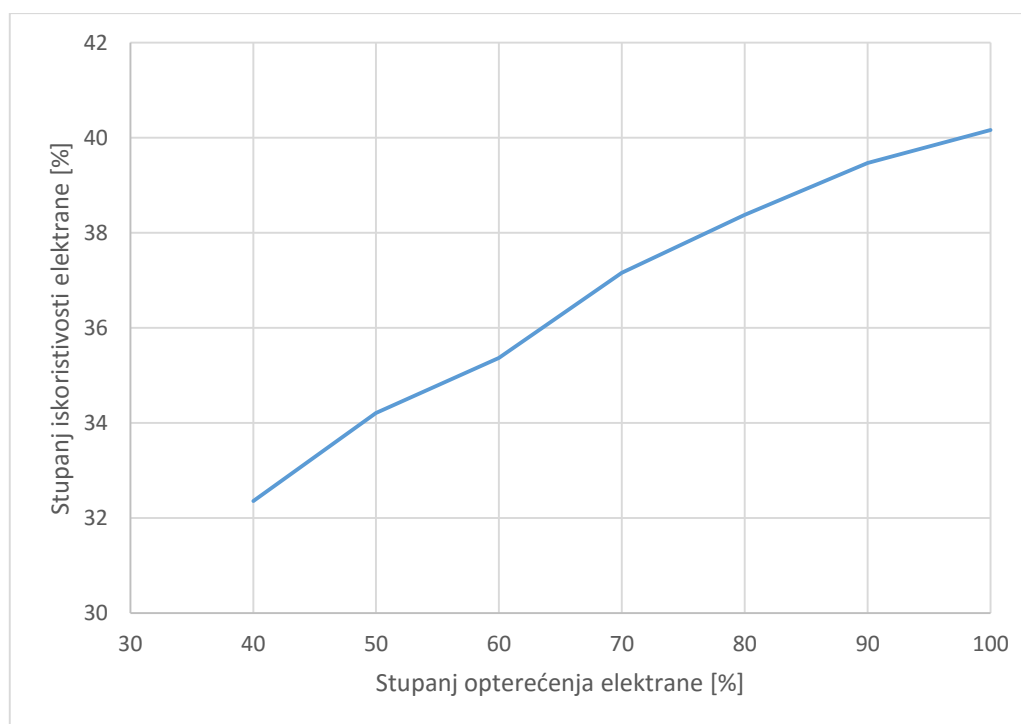
Slika 61. Ovisnost tlaka kondenzacije o površini kondenzatora

Temperatura i tlak kondenzacije padaju s povećanjem površine kondenzatora jer veća površina omogućava izmjenu dovoljne količine topline odnosno za istu količinu potrebne topline moguće je spustiti tlak i temperaturu kondenzacije povećanjem površine kondenzacije.

Sljedeći rezultati predstavljaju izračun parametara pri nižem opterećenju rada postrojenja.

Tablica 5. Vrijednosti stupnja iskoristivosti, temperature i tlaka kondenzacije i izlazne snage s obzirom na stupanj opterećenja postrojenja

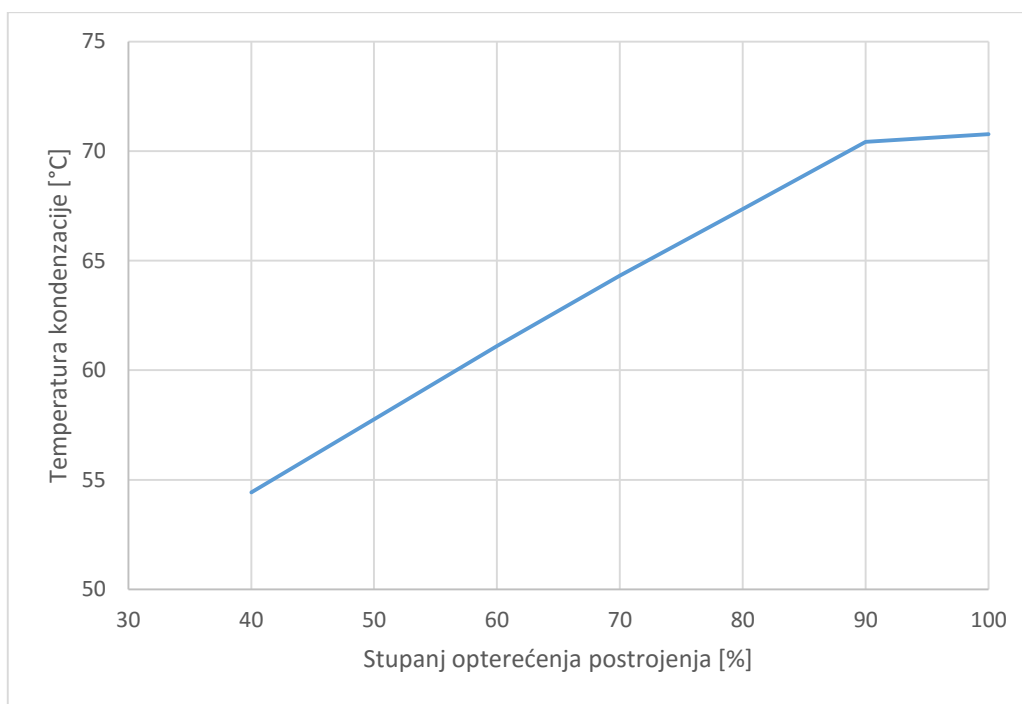
Opterećenje [%]	Etta [%]	p_{kond} [bar]	T_{kond} [°C]	P_{netto} [MW]
40	32,36	0,1113	54,42	260,04
50	34,21	0,1555	57,75	339,3
60	35,37	0,1962	61,1	422,13
70	37,16	0,2466	64,31	507,99
80	38,38	0,2804	67,35	596,74
90	39,47	0,3192	70,43	688,37
100	40,16	0,3244	70,77	770,15



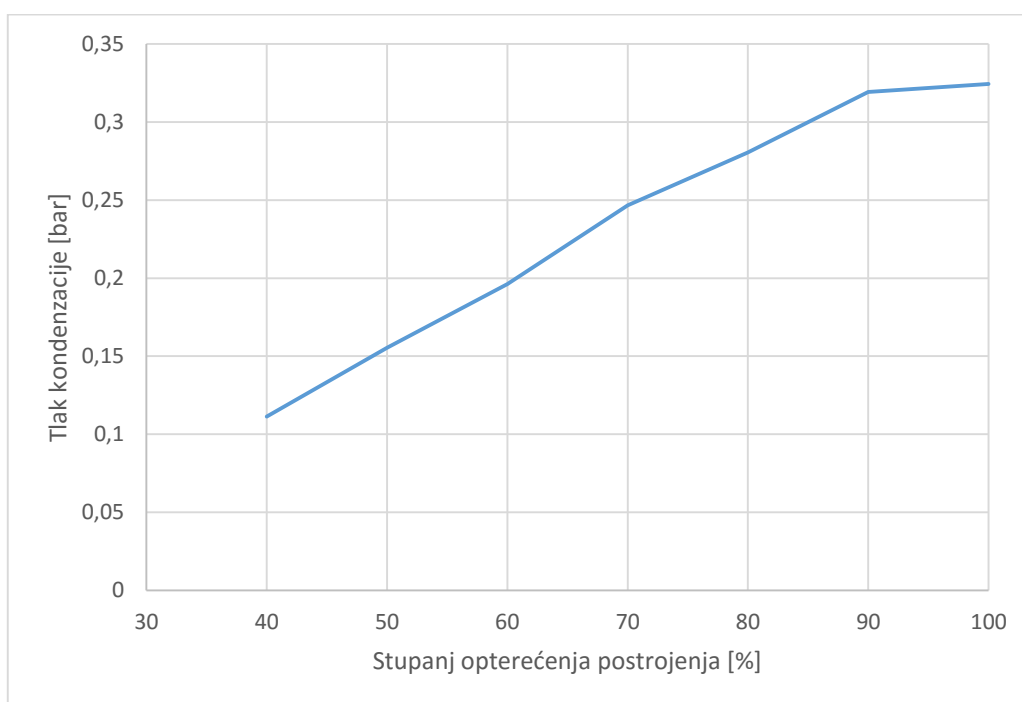
Slika 62. Ovisnost stupnja iskoristivosti elektrane o stupnju opterećenja

Stupanj iskoristivosti elektrane na nižem stupnju opterećenja je očekivano manji jer zbog većeg prigušenja na regulacijskom ventilu prije turbine, kojim smanjujemo potreban protok, dolazi do većeg pada tlaka. To znači da smanjenje stupnja opterećenja elektrane direktno utječe na tlak pregrijanja, odnosno za manje stupnjeve opterećenja tlak kondenzacije će porasti jer će gubici u procesu ekspanzije biti veći zbog prigušenja i proces će se pomaknuti u desno. Tlak i

temperatura kondenzacije padaju s padom opterećenja postrojenja što pozitivno utječe na energetska efikasnost, ali nedovoljno pošto ga veći gubici tijekom ekspanzije snižavaju te na kraju dolazi do smanjenja stupnja iskoristivosti procesa. Rezultati za promjenu tlaka i temperature kondenzacije prikazani su na slikama 63 i 64.



Slika 63. Ovisnost temperature kondenzacije o stupnju opterećenja



Slika 64. Ovisnost tlaka kondenzacije o stupnju opterećenja

6. ZAKLJUČAK

Unatoč velikim ekološkim problemima zbog emisije stakleničkih plinova i nastojanjima da se fosilna goriva i termoelektrane što manje koriste i grade, činjenica je da postoje dijelovi svijeta koji nisu dovoljno razvijeni da proizvode električnu energiju iz obnovljivih izvora energije. Južna Afrika doživljava sve veći razvoj koji je uvjetovan velikim potrebama za električnom energijom i moderna termoelektrana na ugljen, kojeg u tom području ima u izobilju, je dobro i povoljno rješenje za prijeko potrebno povećanje proizvodnje energije. Ekološki problemi tijekom planiranja izgradnje elektrane Medupi svedeni su na minimum u nastojanju da se očuva priroda i kvaliteta zraka. Sa nadkritičnim generatorima pare, tehnologijom čistog ugljena i zrakom hlađenim kondenzatorom, Medupi će spadati u jednu od modernijih termoelektrana u svijetu.

Zrakom hlađeni kondenzatori su izvrsna opcija u nedostatku rashladne vode. Njihova učinkovitost znatno ovisi o vanjskoj temperaturi i površini za izmjenu topline. Da bi elektrana radila u najpovoljnijim uvjetima i da bi se proizvodnja što bolje planirala u elektroenergetskom sustavu, potrebno je precizno proračunati proces. Prosječna ljetna temperatura za područje gdje se elektrana gradi je 40 °C i za tu temperaturu dobiven je stupanj iskoristivosti 40,16 %. Uobičajene vrijednosti stupnja iskoristivosti za nadkritične uvjete pare od 560 °C i tlak od 241 bar su od 40 - 45 %, međutim zbog visoke vanjske temperature ovog područja i korištenja zraka kao rashladnog medija, iskoristivost elektrane Medupi je manja. Pokazano je i da površina izmjene topline preko broja i promjera cijevi, također ima veliki utjecaj na efikasnost postrojenja. Veća površina kondenzatora odnosno veća površina izmjene topline povećava stupanj iskoristivosti postrojenja.

Iako izgaranje fosilnih goriva ima negativan utjecaj na prirodu i zdravlje ljudi, činjenica je da razvojem tehnologije čistog ugljena, povećanjem parametara pare odnosno nadkritičnih uvjeta te ugradnjom raznih filtera, novograđene termoelektrane daju bolju iskoristivost i imaju manje emisije ugljikovog dioksida i čestica.

7. LITERATURA

- [1] Energy crisis – The Case of South Africa, special report, 2008, Rabobank
- [2] <http://www.eskom.co.za/>
- [3] <http://blog.thomsonreuters.com/index.php/south-africas-aging-power-plants-graphic-day/>
- [4] <http://www.eia.gov/>
- [5] <http://www.resourceinvestor.com/2012/06/14/look-overseas-growth-coal>
- [6] <http://www.alstom.com/>
- [7] <http://citizen.co.za/184077/amcu-bringing-marikana-to-medupi/>
- [8] <http://www.power-technology.com/>
- [9] Financing of Kusile and Medupi power plants, South Africa, Profundo economic research
- [10] Mustapić N., Guzović Z., Staniša B.: Energetski strojevi i sustavi, Karlovac, 2013. godina
- [11] <http://powerlab.fsb.hr/enerpedia>
- [12] Guzović Z.: Izmjenjivači topline u termoeenergetskim postrojenjima, Zagreb, 1996. godina
- [13] hr.wikipedia.org
- [14] <http://www.iea.org/>
- [15] Kreuh L.: Generatori pare (parni kotlovi), Zagreb, 1978. godina
- [16] Staden M.P.: An integrated approach to transient simulation of large air cooled condensers using computational fluid dynamics, Faculty of Engineering Rand Afrikaans University, 2000.
- [17] Larinoff M.W., Reichhelm R.: Design and specifications of air – cooled steam condensers, Texas, 1978. godina
- [18] <http://www.cbpg.com/en/products-solutions/air-cooled-condensers-0>
- [19] <http://www.power-serv.com/acc2.html>
- [20] Bogdan Ž., Živković S.A., Dokmanović V., Merić J.: Tehnologije čistog ugljena u strategiji razvoja elektroenergetskog sustava, Energija, 2007. godina
- [21] <http://www.arup.com/>

PRILOZI

I. Kod matematičkog modela u programskom paketu Visual Basic

MODUL 1

Public T_m(20), P(20), eta(20), Pe_z, h_m(20), s(20), D(20), Dod(20), eta_m, eta_e, eta_gp, eta_pumpe, eta_postrojenja, Pu(10), hi(20), si(20), Ti(20), xi(20), h1(20), Q_NT1, Q_NT2, Q_NT3, Q_kond

Sub MEDUPI_800()

Dim iter As Integer

Dim iterGL As Integer

Dim i As Integer

'pocetni uvjeti, inicijalizacija

D(1) = 617

Dod(1) = 30

Dod(2) = 20

Dod(3) = 20

Dod(4) = 30

Dod(5) = 20

Dod(6) = 30

P(2) = 50.5

For Ii = 1 To 40

P(2) = P(2) + 0.1

iter = 0

pocetak:

iter = iter + 1

1.stupanj VT ekspanzija 1-2

$$h_m(1) = \text{Voda}(1, P(1), T_m(1))$$

$$s(1) = \text{Voda}(3, P(1), T_m(1))$$

$$si(2) = s(1)$$

$$Ti(2) = \text{VodaX}(13, P(2), si(2))$$

$$hi(2) = \text{Voda}(1, P(2), Ti(2))$$

$$h_m(2) = h_m(1) - \eta(1) * (h_m(1) - hi(2))$$

$$Pu(1) = D(1) * (h_m(1) - h_m(2))$$

$$D(2) = D(1) - Dod(1)$$

2.stupanj ST ekspanzija, 3-4

$$T_m(3) = 570$$

$$h_m(3) = \text{Voda}(1, P(3), T_m(3))$$

$$s(3) = \text{Voda}(3, P(3), T_m(3))$$

$$si(4) = s(3)$$

$$Ti(4) = \text{VodaX}(13, P(4), si(4))$$

$$hi(4) = \text{Voda}(1, P(4), Ti(4))$$

$$h_m(4) = h_m(3) - \eta(2) * (h_m(3) - hi(4))$$

$$T_m(4) = \text{VodaX}(1, P(4), h_m(4))$$

$$s(4) = \text{Voda}(3, P(4), T_m(4))$$

$$D(3) = D(2) - Dod(2)$$

$$Pu(2) = D(2) * (h_m(3) - h_m(4))$$

'3.stupanj ST ekspanzija, 4-5

$$si(5) = s(4)$$

$$Ti(5) = VodaX(13, P(5), si(5))$$

$$hi(5) = Voda(1, P(5), Ti(5))$$

$$h_m(5) = h_m(4) - \eta(3) * (h_m(4) - hi(5))$$

$$T_m(5) = VodaX(11, P(5), h_m(5))$$

$$s(5) = Voda(3, P(5), T_m(5))$$

$$D(4) = D(3) - Dod(3)$$

$$Pu(3) = D(3) * (h_m(4) - h_m(5))$$

'4.stupanj ST ekspanzija, 5-6

$$si(6) = s(5)$$

$$Ti(6) = VodaX(13, P(6), si(6))$$

$$hi(6) = Voda(1, P(6), Ti(6))$$

$$h_m(6) = h_m(5) - \eta(4) * (h_m(5) - hi(6))$$

$$T_m(6) = VodaX(11, P(6), h_m(6))$$

$$s(6) = Voda(3, P(6), T_m(6))$$

$$Pu(4) = D(4) * (h_m(5) - h_m(6))$$

$$D(5) = D(4) - Dod(4)$$

'5.stupanj NT ekspanzija, 6-7

'provjera za područje zasićenja

$$si(7) = s(6)$$

$$s7_zas = Zas(13, P(7))$$

If $s(6) \leq s7_zas$ Then

$$xi(7) = (s(6) - Zas(3, P(7))) / (Zas(13, P(7)) - Zas(3, P(7)))$$

$$hi(7) = xi(7) * (Zas(11, P(7)) - Zas(1, P(7))) + Zas(1, P(7))$$

Else

$$Ti(7) = VodaX(13, P(7), si(7))$$

$$hi(7) = Voda(1, P(7), Ti(7))$$

End If

$$h_m(7) = h_m(6) - eta(5) * (h_m(6) - hi(7))$$

$$T_m(7) = VodaX(11, P(7), h_m(7))$$

$$s(7) = Voda(3, P(7), T_m(7))$$

$$Pu(5) = D(5) * (h_m(6) - h_m(7))$$

$$D(6) = D(5) - Dod(5)$$

'6 stupanj

'provjera za područje zasićenja, 7-8

$$si(8) = s(7)$$

$$s8_zas = Zas(13, P(8))$$

If $s(7) \leq s8_zas$ Then

$$xi(8) = (s(7) - Zas(3, P(8))) / (Zas(13, P(8)) - Zas(3, P(8)))$$

$$hi(8) = xi(8) * (Zas(11, P(8)) - Zas(1, P(8))) + Zas(1, P(8))$$

Else

$$Ti(8) = VodaX(3, P(8), si(8))$$

$$hi(8) = Voda(1, P(8), Ti(8))$$

End If

$$h_m(8) = h_m(7) - \eta(6) * (h_m(7) - h_i(8))$$

$$T_m(8) = \text{VodaX}(11, P(8), h_m(8))$$

$$s(8) = \text{Voda}(3, P(8), T_m(8))$$

$$Pu(6) = D(6) * (h_m(7) - h_m(8))$$

$$D(7) = D(6) - \text{Dod}(6)$$

'7 stupanj NT ekspanzija, 8-9

'provjera za područje zasićenja

$$si(9) = s(8)$$

$$s9_zas = \text{Zas}(13, P(9))$$

If $s(8) \leq s9_zas$ Then

$$xi(9) = (s(8) - \text{Zas}(3, P(9))) / (\text{Zas}(13, P(9)) - \text{Zas}(3, P(9)))$$

$$hi(9) = xi(9) * (\text{Zas}(11, P(9)) - \text{Zas}(1, P(9))) + \text{Zas}(1, P(9))$$

$$Ti(9) = \text{Zas}(0, P(9))$$

Else

$$Ti(9) = \text{VodaX}(3, P(9), si(9))$$

$$hi(9) = \text{Voda}(1, P(9), Ti(9))$$

End If

$$h_m(9) = h_m(8) - 0.78 * (h_m(8) - hi(9))$$

$$T_m(9) = 56.28$$

If $h_m(9) \leq \text{Zas}(11, P(9))$ Then

$$T_m(9) = \text{Zas}(0, P(9))$$

Else

$$T_m(9) = \text{VodaX}(11, P(9), h_m(9))$$

End If

$$Pu(7) = D(7) * (h_m(8) - h_m(9))$$

'kondenzatna pumpa 10-11

$$P(10) = P(9)$$

$$h_m(10) = Zas(1, P(10))$$

$$s(10) = Zas(3, P(10))$$

$$Q_kond = D(7) * (h_m(9) - h_m(10))$$

$$si(11) = s(10)$$

$$P(11) = P(5)$$

$$Ti(11) = VodaX(3, P(11), si(11))$$

$$hi(11) = Voda(1, P(11), Ti(11))$$

$$h_m(11) = h_m(10) + (hi(11) - h_m(10)) / eta_pumpe$$

$$T_m(11) = VodaX(1, P(11), h_m(11))$$

$$P_kp = D(7) * (h_m(11) - h_m(10))$$

'niskotlacni zagrijac vode, 11-12

$$hod6 = Zas(1, P(8))$$

$$T12_zas = Zas(0, P(8))$$

$$h_m(12) = Voda(1, P(5), T12_zas)$$

$$T_m(12) = VodaX(1, P(5), h_m(12))$$

$$Q_NT1 = (D(7) + Dod(6)) * (h_m(12) - h_m(11))$$

'niskotlačni zagrijac vode, 12-13

$$\text{hod5} = \text{Zas}(1, \text{P}(7))$$

$$\text{T13_zas} = \text{Zas}(0, \text{P}(7))$$

$$\text{h_m}(13) = \text{Voda}(1, \text{P}(5), \text{T13_zas})$$

$$\text{T_m}(13) = \text{VodaX}(1, \text{P}(5), \text{h_m}(13))$$

$$\text{Q_NT2} = (\text{D}(7) + \text{Dod}(6) + \text{Dod}(5)) * (\text{h_m}(13) - \text{h_m}(12))$$

'srednjetačni zagrijac vode (13-14)

$$\text{hod4} = \text{Zas}(1, \text{P}(6))$$

$$\text{T14_zas} = \text{Zas}(0, \text{P}(6))$$

$$\text{h_m}(14) = \text{Voda}(1, \text{P}(5), \text{T14_zas})$$

$$\text{T_m}(14) = \text{VodaX}(1, \text{P}(5), \text{h_m}(14))$$

$$\text{Q_NT3} = (\text{D}(7) + \text{Dod}(6) + \text{Dod}(5) + \text{Dod}(4)) * (\text{h_m}(14) - \text{h_m}(13))$$

'otplinjac- regeneratorski (14-15)

$$\text{h_m}(15) = \text{Zas}(1, \text{P}(5))$$

$$\text{s}(15) = \text{Zas}(3, \text{P}(5))$$

$$\text{T_m}(15) = \text{Zas}(0, \text{P}(5))$$

$$\text{Q_otp} = (\text{D}(7) + \text{Dod}(6) + \text{Dod}(5) + \text{Dod}(4) + \text{Dod}(3)) * (\text{h_m}(15) - \text{h_m}(14))$$

'napojna pumpa iza otplinjaca (15-16)

$$\text{P}(16) = \text{P}(1)$$

$$\text{si}(16) = \text{s}(15)$$

$$\text{Ti}(16) = 216.33$$

$$h_i(16) = Voda(1, P(16), Ti(16))$$

$$h_m(16) = h_m(15) + (h_i(16) - h_m(15)) / \eta_{pumpe}$$

$$P_{np} = D(1) * (h_m(16) - h_m(15))$$

'visokotlačni zagrijac (16-17)

$$hod2 = Zas(1, P(4))$$

$$T17_{zas} = Zas(0, P(4))$$

$$h_m(17) = Voda(1, P(1), T17_{zas})$$

$$T_m(17) = T17_{zas}$$

$$Q_{VT1} = (D(7) + Dod(6) + Dod(5) + Dod(4) + Dod(3) + Dod(2)) * (h_m(17) - h_m(16))$$

'visokotlačni pregrijac (17-18)

$$hod1 = Zas(1, P(2))$$

$$T18_{zas} = Zas(0, P(2))$$

$$h_m(18) = Voda(1, P(1), T18_{zas})$$

$$T_m(18) = T18_{zas}$$

$$Q_{VT2} = (D(7) + Dod(6) + Dod(5) + Dod(4) + Dod(3) + Dod(2) + Dod(1)) * (h_m(18) - h_m(17))$$

'ukupne snage

$$P_{pumpe} = (P_{kp} + P_{np}) / 1000$$

$$P_{uk} = (Pu(1) + Pu(2) + Pu(3) + Pu(4) + Pu(5) + Pu(6) + Pu(7)) * \eta_m * \eta_e / 1000$$

$$\Delta = P_{uk} - P_{e_z}$$

$$Q_{gp} = (D(1) * (h_m(1) - h_m(18)) + D(2) * (h_m(3) - h_m(2))) / (1000 * \eta_{gp})$$

$$P_{\text{netto}} = P_{\text{uk}} - P_{\text{pumpe}}$$

$$\eta(0) = P_{\text{netto}} / Q_{\text{gp}}$$

$$D(1) = D(1) - 0.5 * \Delta$$

'iskoristivost

$$Q_{\text{gp}} = (D(1) * (h_m(1) - h_m(18)) + (D(1) - D_{\text{od}}(1)) * (h_m(3) - h_m(2))) / (1000 * \eta_{\text{gp}})$$

$$P_{\text{netto}} = P_{\text{uk}} - P_{\text{pumpe}}$$

$$\eta_{\text{postrojenja}} = P_{\text{netto}} / Q_{\text{gp}}$$

$$D_{\text{od}}(1) = (D(1) * (h_m(18) - h_m(17))) / (h_m(2) - h_{\text{od}}(1))$$

$$D_{\text{od}}(2) = ((D(1) * (h_m(17) - h_m(16))) - (D_{\text{od}}(1) * (h_{\text{od}}(1) - h_{\text{od}}(2)))) / (h_m(4) - h_{\text{od}}(2))$$

$$D_{\text{od}}(3) = ((D(1) * h_m(15) - D(4) * h_m(14) - (D_{\text{od}}(1) + D_{\text{od}}(2)) * h_{\text{od}}(2))) / h_m(5)$$

$$D_{\text{od}}(4) = (D(4) * (h_m(14) - h_m(13))) / (h_m(6) - h_{\text{od}}(4))$$

$$D_{\text{od}}(5) = ((D(4) * (h_m(13) - h_m(12)) - D_{\text{od}}(4) * (h_{\text{od}}(4) - h_{\text{od}}(5)))) / (h_m(7) - h_{\text{od}}(5))$$

$$D_{\text{od}}(6) = ((D(4) * (h_m(12) - h_m(11)) - (D_{\text{od}}(4) + D_{\text{od}}(5)) * (h_{\text{od}}(5) - h_{\text{od}}(6)))) / (h_m(8) - h_{\text{od}}(6))$$

'ispis podataka

$$\text{Sheets("Podaci").Cells}(3 + \text{iter}, 10) = \text{iter}$$

$$\text{Sheets("Podaci").Cells}(3 + \text{iter}, 11) = \Delta$$

$$\text{Sheets("Podaci").Cells}(3 + \text{iter}, 12) = P_{\text{uk}}$$

$$\text{Sheets("Podaci").Cells}(3 + \text{iter}, 13) = D(1)$$

$$\text{Sheets("Podaci").Cells}(3 + \text{iter}, 14) = D_{\text{od}}(1)$$

$$\text{Sheets("Podaci").Cells}(3 + \text{iter}, 15) = D_{\text{od}}(2)$$

$$\text{Sheets("Podaci").Cells}(3 + \text{iter}, 16) = D_{\text{od}}(3)$$

$$\text{Sheets("Podaci").Cells}(3 + \text{iter}, 17) = D_{\text{od}}(4)$$

```
Sheets("Podaci").Cells(3 + iter, 18) = Dod(5)

Sheets("Podaci").Cells(3 + iter, 19) = Dod(6)

Sheets("Optimizacija").Cells(3 + iter, 5) = P_netto

Sheets("Optimizacija").Cells(3 + iter, 2) = eta_postrojenja
```

```
If iter > 100 Then GoTo kraj
```

```
If Abs(Delta) > 0.001 Then GoTo pocetak
```

```
kraj:
```

```
Sheets("Optimizacija").Cells(Ii + 1, 13) = P(2)
```

```
Sheets("Optimizacija").Cells(Ii + 1, 14) = eta_postrojenja
```

```
Next
```

```
End Sub
```

MODUL 2

```
Sub AlfaKon()
```

```
'Dim Ug, NiGas, tsr, Dv, Du, LambdaGas, PrGas, alfa, CZ, Cs, s1, s2, P_Kor, Nu(20), Re,
AlfaKon, Tz_ul, Tz_izl, cpz, RoPare, RoVode, NiPare, NiVode, Re_z, T(20), P(20), eta(20),
Pe_z, h_m(20), s(20), D(20), Dod(20), eta_m, eta_e, eta_gp, eta_pumpe, eta_postrojenja,
Pu(10), hi(20), si(20), Ti(20), xi(20), h1(20), Q_NT1, Q_NT2, Q_NT3, Q_kond
```

```
Dim iter, iterGL As Integer
```

```
Dim i As Integer
```

```
T_m(1) = Sheets("Podaci").Cells(6, 5)
```

```
D_n(1) = 724.7
```

```
D_n(2) = 662.9
```

```
D_n(3) = 635.55
```

```
D_n(4) = 621.5
```

$$D_n(5) = 566$$

$$D_n(6) = 533.82$$

$$D_n(7) = 480.17$$

$$\text{opt} = 1$$

$$Pe_z = 794 * \text{opt}$$

$$D(1) = 617 * \text{opt}$$

$$Dod(1) = 30 * \text{opt}$$

$$Dod(2) = 20 * \text{opt}$$

$$Dod(3) = 20 * \text{opt}$$

$$Dod(4) = 30 * \text{opt}$$

$$Dod(5) = 20 * \text{opt}$$

$$Dod(6) = 30 * \text{opt}$$

$$P(1) = \text{Sheets("Podaci").Cells}(7, 5) \text{ 'tlak svježe pare}$$

$$P(2) = \text{Sheets("Podaci").Cells}(8, 5) \text{ 'tlak 1. oduzimanja}$$

$$P(3) = \text{Sheets("Podaci").Cells}(9, 5)$$

$$P(4) = \text{Sheets("Podaci").Cells}(10, 5) \text{ 'tlak 2. oduzimanja}$$

$$P(5) = \text{Sheets("Podaci").Cells}(11, 5) \text{ 'tlak 3. oduzimanja}$$

$$P(6) = \text{Sheets("Podaci").Cells}(12, 5) \text{ 'tlak 4. oduzimanja}$$

$$P(7) = \text{Sheets("Podaci").Cells}(13, 5) \text{ 'tlak 5. oduzimanja}$$

$$P(8) = \text{Sheets("Podaci").Cells}(14, 5) \text{ 'tlak 6. oduzimanja}$$

$$P(9) = \text{Sheets("Podaci").Cells}(15, 5) \text{ 'tlak kondenzatora}$$

$$\text{eta}(1) = \text{Sheets("Podaci").Cells}(16, 5) \text{ 'iskoristivosti pojedinih oduzimanja}$$

$$\text{eta}(2) = \text{Sheets("Podaci").Cells}(17, 5)$$

$$\text{eta}(3) = \text{Sheets("Podaci").Cells}(18, 5)$$

```
eta(4) = Sheets("Podaci").Cells(19, 5)
eta(5) = Sheets("Podaci").Cells(20, 5)
eta(6) = Sheets("Podaci").Cells(21, 5)
eta(7) = Sheets("Podaci").Cells(22, 5)
eta_m = Sheets("Podaci").Cells(23, 5) 'mehanički eta
eta_e = Sheets("Podaci").Cells(24, 5) 'električni eta
eta_gp = Sheets("Podaci").Cells(25, 5)
eta_pumpe = Sheets("Podaci").Cells(26, 5)

P_n(9) = 0.282
P_n(8) = 2.07
P_n(7) = 5.34
P_n(6) = 16.37
P_n(5) = 22.23
P_n(4) = 33.5
P_n(3) = 56.8
P_n(2) = 56.8
P_n(1) = 282.55

iterGL = 0

pocetak:

iterGL = iterGL + 1

P(9) = P(9) + 0.0000001 * pogreska

MEDUPI_800

P(8) = Sqr(P(9) ^ 2 + (P_n(8) ^ 2 - P_n(9) ^ 2) * (D_n(7) / D(7)) ^ -2)
P(7) = Sqr(P(8) ^ 2 + (P_n(7) ^ 2 - P_n(8) ^ 2) * (D_n(6) / D(6)) ^ -2)
```

$$P(6) = \text{Sqr}(P(7) ^ 2 + (P_n(6) ^ 2 - P_n(7) ^ 2) * (D_n(5) / D(5)) ^ -2)$$

$$P(5) = \text{Sqr}(P(6) ^ 2 + (P_n(5) ^ 2 - P_n(6) ^ 2) * (D_n(4) / D(4)) ^ -2)$$

$$P(4) = \text{Sqr}(P(5) ^ 2 + (P_n(4) ^ 2 - P_n(5) ^ 2) * (D_n(3) / D(3)) ^ -2)$$

$$P(3) = \text{Sqr}(P(4) ^ 2 + (P_n(3) ^ 2 - P_n(4) ^ 2) * (D_n(2) / D(2)) ^ -2)$$

$$P(2) = P(3)$$

$$P(1) = \text{Sqr}(P(2) ^ 2 + (P_n(1) ^ 2 - P_n(2) ^ 2) * (D_n(1) / D(1)) ^ -2)$$

$$wz = 3$$

$$\text{NiGas} = 0.00001937$$

$$\text{tsr} = 45$$

$$Dv = 0.06$$

$$Du = 0.05$$

$$\text{LambdaGas} = 0.027385$$

$$\text{PrGas} = 0.711$$

$$Tz_ul = 40$$

$$\text{cpz} = 1007.7$$

$$\text{RoZraka} = 1.0953$$

$$L = 11$$

$$\text{Tszp} = 52.69$$

$$wp = 78$$

$$\text{RoPare} = 0.094$$

$$\text{RoVode} = 986.76$$

$$\text{NiPare} = 0.0000107$$

$$\text{NiVode} = 0.000523$$

$$\text{LambdaVode} = 0.64923$$

qm_zraka = 1000

D_vent = 11

korak = 0.03

A = (Du * 3.14159) * 11

nc = 244

Re_z = RoZraka * wz * Dv / NiGas

Nu_z = 0.21 * (Re_z ^ 0.62) * (PrGas ^ 0.38)

alfa_z = (Nu_z * LambdaGas) / Dv

alfa_v = 8000

qm_pare = Q_kond / (h_m(9) - h_m(10))

wc = qm_pare / (nc * A * RoPare)

Tz_izl = (Q_kond + qm_zraka * cpz * Tz_ul) / (qm_zraka * cpz)

k = (Dv / (Du * alfa_v) + (((Dv / 2) / 58) * Log(Dv / Du)) + 1 / alfa_z) ^ (-1)

dtm = ((T_m(9) - Tz_ul) - (T_m(9) - Tz_izl)) / Log((T_m(9) - Tz_ul) / (T_m(9) - Tz_izl))

Qkond_potreban = A * k * dtm * 50 * nc * 64 / 1000

pogreska = Q_kond - Qkond_potreban

Sheets("Optimizacija").Cells(3 + iterGL, 1) = iterGL

Sheets("Optimizacija").Cells(3 + iterGL, 3) = P(9)

Sheets("Optimizacija").Cells(3 + iterGL, 4) = T_m(9)

Sheets("Optimizacija").Cells(3 + iterGL, 6) = Qkond_potreban

Sheets("Optimizacija").Cells(3 + iterGL, 7) = Tz_izl

If Abs(pogreska) > 1 Then GoTo pocetak

End Sub

